

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

Desarrollo de software para el control de dispositivos  
ópticos y su uso en medidas experimentales de  
sensores y láseres de fibra óptica



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: David Erro Murillo

Directores:

Rosa Ana Pérez Herrera

Daniel Leandro González

Pamplona, 26 de junio de 2017



*Tengo que dar gracias a todas las personas que me han ayudado en la realización de este proyecto, con mención especial a mis directores Rosa Ana y Daniel, así como a Iñaki y a todas las personas del laboratorio que me han echado una mano. También a mi familia, amigos y gente especial que ha estado ahí durante estos largos años de carrera o que han llegado en los últimos momentos de la misma.*

*Muchas gracias a todos.*

## RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado ha sido realizado por David Erro Murillo, estudiante del Grado de Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación, motivado por la importancia de las tecnologías ópticas dentro del ámbito de las comunicaciones.

El trabajo se dividirá en dos bloques: un software para el control de un dispositivo interrogador para el análisis y caracterización de distintos tipos de sensores de fibra óptica y, como segundo bloque, un estudio experimental sobre láseres pulsados todo fibra.

En el primer bloque se desarrollará brevemente las características del software, explicando su funcionamiento y mostrando sus funciones más importantes. Posteriormente se comprobará su funcionamiento práctico mediante la medición de distintos sensores, lo que nos ayudará a mostrar las limitaciones del software. Se propondrán distintas líneas de trabajo futuras para intentar solventar estas limitaciones.

En el segundo bloque se mostrará el esquema y los componentes de un láser pulsado todo fibra, explicando el método seguido para su montaje en el laboratorio. Tras el montaje, se procederá a caracterizar el láser, viendo sus espectros y la forma de sus pulsos en distintos dominios. Para finalizar, se tratará de modificar el diseño para conseguir un láser sintonizable sin que esto afecte a sus características.





## ÍNDICE

LISTA DE PALABRAS CLAVE .....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	9
1.1.-Introducción .....	9
1.2.-Fibra óptica.....	9
1.2.1.-Tipos de fibra .....	10
1.2.2.-Limitaciones de la fibra óptica .....	11
1.2.3.- Efectos no lineales .....	12
1.3.-Sensores ópticos.....	13
1.3.1.-Tipos de sensores ópticos.....	14
1.3.2.-Estabilidad y “drift” .....	15
1.3.3.-Sensores ópticos comerciales.....	15
1.4.-Dispositivos ópticos.....	16
1.4.1.-Acopladores.....	17
1.4.2.-Atenuadores ópticos .....	17
1.4.3.- Aisladores .....	18
1.4.4.-Controladores de polarización.....	19
1.4.5.-Multiplexor por división en longitud de onda (WDM) .....	20
1.4.6.-Redes de difracción de Bragg .....	21
1.5.-Amplificadores ópticos .....	23
1.5.1.-Amplificadores de fibra dopada con tierras raras.....	23
1.5.2.-Amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA).....	24
1.5.3.-Ganancia en los EDFA .....	25
1.6.-Cavidades ópticas .....	26
1.7.-Método de láseres enganchados en fase (Mode Locking).....	27
1.7.1.-Enganche de fase activo .....	29
1.7.2.-Enganche de fase pasivo.....	30
CAPÍTULO 2 – SOFTWARE PARA EL INTERROGADOR SI155 .....	33
2.1.-Introducción .....	33
2.2.-Desarrollo del software y modo de empleo .....	35
2.2.1.-Conexión con el interrogador .....	35
2.2.2.-Ventana principal y opciones.....	36

2.2.3.-Obtención de datos y funcionamiento del software .....	42
2.3.-Medidas experimentales con sensores .....	50
2.3.1-Medida de un sensor de humedad .....	51
2.3.2-Medida de un sensor de vibración .....	54
2.4.-Conclusiones.....	62
CAPÍTULO 3 – ESTUDIO DE LÁSER PULSADO TODO FIBRA .....	63
3.1.-Introducción .....	63
3.2.-Caracterización de las fibras .....	63
3.3.-Componentes a emplear y montaje del diseño .....	64
3.4.-Caracterización del láser.....	67
3.4.1.-Dominio óptico .....	68
3.4.2.-Dominio frecuencial .....	70
3.4.2.-Dominio temporal .....	71
3.5.-Modificación del diseño para obtener un láser pulsado sintonizable.....	73
3.6.-Conclusiones.....	75
CAPÍTULO 4 – CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS .....	77
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	79
Anexo .....	81

## **LISTA DE PALABRAS CLAVE**

ESA = Analizador de espectros eléctrico

OSA = Analizador de espectros ópticos

WDM = Multiplexación por división en longitud de onda

EDFA = Amplificador de fibra dopada con erbio

EDF = Fibra dopada con erbio

FBG = Red de difracción de Bragg

ASE = Emisión de amplificación espontánea

SMF = Fibra monomodo estándar

PM = Mantenedor de polarización

FWHM = Anchura a media altura

ISI = Interferencia entre símbolos adyacentes

GHz = Gigahercios

MHz = Megahercios

ps = picosegundos

SAM = Saturable Absorber Mirror

## INTRODUCCIÓN

Durante décadas, los sensores electromecánicos han sido los más empleados para la medición de distintos fenómenos mecánicos y físicos. Sin embargo, debido a su sensibilidad a las interferencias electromagnéticas y a la peligrosidad asociada a su uso en ciertos entornos inflamables, así como la sencillez, pasividad, inmunidad, ligereza y el bajo coste de los sensores de fibra óptica han logrado que éstos últimos se empleen cada vez con mayor asiduidad.

El uso de sensores de fibra óptica basados en redes de difracción de Bragg (FBG, según sus siglas en inglés), cuya naturaleza selectiva en longitud de onda hacen posible la multiplexación de diferentes sensores mediante la técnica de multiplexación por división en longitud de onda (WDM, según sus siglas en inglés), permite la implementación de multitud de sensores, con distintas longitudes de onda, a lo largo de una única fibra.

Para ver la respuesta que tienen estos sensores frente a la variación de distintas magnitudes físicas (temperatura, tensión, humedad, etc.) se emplean, entre otros, unos dispositivos llamados interrogadores, los cuales proporcionan el espectro óptico en tiempo real. Sin embargo, en ciertas ocasiones el software que nos proporciona el proveedor es insuficiente para ciertas aplicaciones, para las cuales es necesario un procesamiento, también en tiempo real, de los datos obtenidos.

# CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 1.1.-Introducción

En este capítulo se describen brevemente los fundamentos de propagación de la luz por la fibra óptica y sus características, además de los diferentes tipos de sensores de fibra óptica, así como otros conceptos de interés para este proyecto, como las redes de difracción de Bragg, moduladores ópticos, acopladores y multiplexores.

## 1.2.-Fibra óptica

La fibra óptica es un tipo de guía de onda empleada como medio de transmisión, habitualmente en redes de datos y telecomunicaciones, consistente en un núcleo de material transparente (vidrio o plástico, en comunicaciones se emplea como material el sílice y sílice dopado) y un revestimiento de composición similar, pero con un índice de refracción ligeramente diferente, por el que se envían pulsos de luz para transmitir datos.

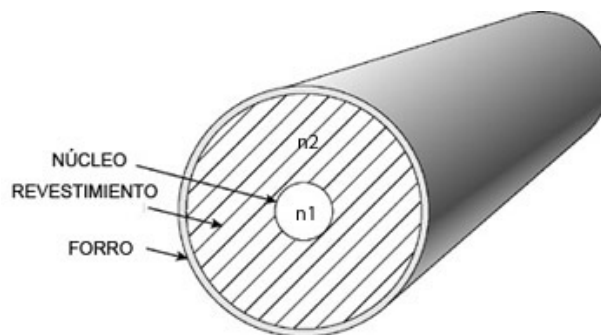


Figura 1.1. Estructura de una fibra óptica [1]

El guiado de la luz se produce por la reflexión interna de la luz debida a la diferencia de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento y al ángulo de incidencia de la luz, especificado por la Ley de Snell, de tal forma que todo el haz de luz se confina en el núcleo de la fibra:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

(donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices del núcleo y revestimiento respectivamente)

Para un ángulo de incidencia mayor que un cierto ángulo crítico  $\theta_c$ :

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

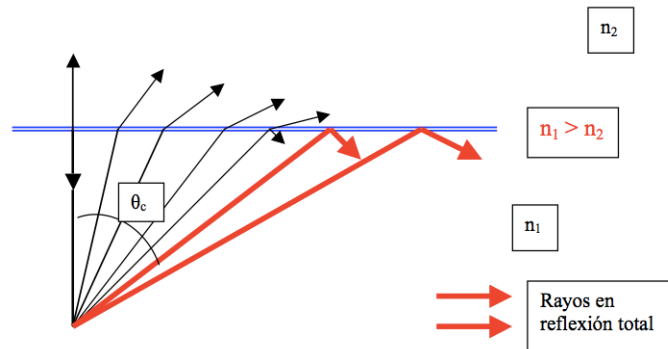


Figura 1.2. Esquema de reflexión de un haz de luz

El rayo incidente no es capaz de atravesar la superficie que separa el núcleo y el recubrimiento, por lo que se refleja completamente, quedando confinado en el núcleo de la fibra. El funcionamiento de la transmisión por fibra óptica se basa en estos fenómenos.

### 1.2.1.-Tipos de fibra

Existen dos tipos de fibra óptica en función del número de modos que viajan por ella, monomodo (únicamente hay un modo guiado) y multimodo (dos o más modos). Estas últimas, en función de la variación del índice de refracción del núcleo se pueden clasificar en dos tipos: fibra de *salto de índice* (los índices de refracción del núcleo y del revestimiento son uniformes, por lo que el cambio de índice de refracción al pasar de una zona a otra cambia bruscamente) y fibra de *índice gradual* (el índice de refracción del núcleo va variando de forma gradual, desde el centro del núcleo hasta el revestimiento. Esto permite reducir los efectos de la dispersión modal, de la que se hablará a continuación).

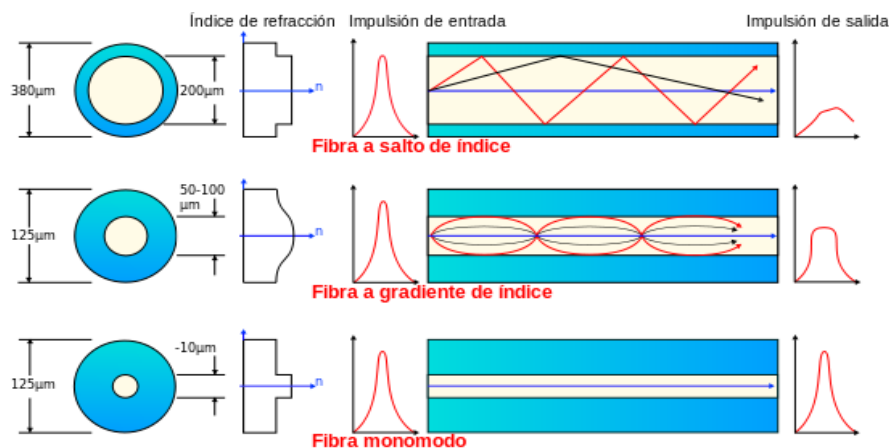


Figura 1.3. Tipos de fibra y propagación de la luz en función del núcleo [1]

### 1.2.2.-Limitaciones de la fibra óptica

La fibra óptica presenta dos limitaciones principales en cuanto a longitud, debido a pérdidas dentro de la fibra, y en velocidad al emplear transmisión digital, debido al ensanchamiento de pulsos dentro de la fibra con la consecuente interferencia entre símbolos adyacentes (ISI): atenuación y dispersión respectivamente.

La atenuación es la pérdida de potencia de la señal que se transmite a través de la fibra, causando una reducción de la potencia promedio que llega al receptor, lo que limita la distancia de transmisión, considerando que los receptores requieren una cantidad mínima de potencia para reconocer la señal que se transmite. Pese a ello, la atenuación de la fibra es mucho menor que en otros conductores convencionales, como el cable telefónico o el cable coaxial.

La atenuación puede estar causada por varios factores, clasificables en dos categorías: Intrínsecos y Extrínsecos.

- La *atenuación intrínseca* ocurre por factores inherentes a la fibra, causada por las impurezas del vidrio durante el proceso de fabricación. Cuando la señal de luz se encuentra con una impureza puede ser absorbida o esparcida. La dispersión de la luz por impurezas supone más del 95% de las pérdidas en la fibra, mientras que la absorción supone únicamente un 4 o 5% de las mismas. Las pérdidas por atenuación intrínseca se pueden reducir considerablemente empleando buenas metodologías de fabricación.
- La *atenuación extrínseca* puede ser causada por dos mecanismos externos: el macrodoblado y el microdoblado. Ambos causan una reducción de la potencia óptica. El primero de ellos, se debe a la presencia de una curva en la fibra, afectando al índice de refracción y al ángulo crítico del haz de luz en un área específica. Como consecuencia, la luz que viaja por el núcleo puede refractarse, produciéndose unas pérdidas reversibles al desaparecer el doblado. Para prevenir esto, todos los cables de fibra tienen un ángulo mínimo de curvatura (en torno a 10 o 15 veces el diámetro externo de la fibra). El segundo, se debe a un doblado menor, generalmente debido a presión ejercida sobre la fibra. También pueden generarse debido a cambios de temperatura, tensiones durante la colocación del cable o alguna fuerza que provoque una rotura. Estos microdoblos pueden no ser visibles a simple vista.

En cuanto a la dispersión, se pueden distinguir dos tipos fundamentales:

- La *dispersión intermodal*, presente únicamente en fibras multimodo debido a la presencia de más de un modo de propagación y, debido a la diferencia de caminos al propagarse éstos por la fibra, lo que provoca diferentes tiempos de llegada que se traduce en un pulso de entrada ensanchado temporalmente.

- La *dispersión intramodal o cromática*, especialmente importante en las fibras monomodo y presente debido al coeficiente de dispersión positivo que tienen las fibras convencionales, lo que provoca una dependencia frecuencial del índice de refracción por lo que, para diferentes longitudes de onda, el índice de refracción es distinto y, dado que los pulsos dentro de una fibra están compuestos de varias longitudes de onda, éstos se ven ensanchados.

Cabe mencionar también otro tipo de dispersión, menos importante que los anteriores pero que toma presencia a altas velocidades de transmisión: la *dispersión por modo de polarización*. Se produce debido a la sutil diferencia entre los ejes mayor y menor del núcleo, lo que provoca que no sea perfectamente circular, sino que tome una cierta forma elíptica. La luz que viaja por la fibra tiene dos modos de polarización, perpendiculares entre ellos. Esa diferencia de ejes de la fibra provoca una pequeña diferencia en el índice de refracción, y asociada a esto la propiedad llamada *birrefringencia*. Debido a esta propiedad, la fibra no mantiene el estado de polarización de la señal, sino que se produce un intercambio periódico de los estados de polarización, lo que retarda un modo polarizado respecto al otro, distinguiéndose un eje “rápido” y otro “lento”, implicando una diferencia de fase entre las ondas propagadas. Además, la birrefringencia no se mantiene constante, sino que cambia aleatoriamente debido a fluctuaciones de la forma del núcleo, por lo que la polarización inicial se distorsiona, alcanzando rápidamente un estado de polarización arbitrario.

### 1.2.3.- Efectos no lineales

A bajas potencias, los efectos no lineales son despreciables frente a la dispersión modal e intramodal. Sin embargo, el empleo de fuentes de mayor potencia y de amplificadores ópticos con lo que aumenta la densidad de potencia en el núcleo de la fibra debido a sus reducidas dimensiones, así como la alta potencia de pico de los pulsos a altas velocidades provoca la excitación del régimen no lineal. En este régimen aparecen nuevas longitudes de onda que interaccionan con las originales, dando lugar a efectos como la *diafonía* o la *distorsión*. También aparece una cierta atenuación extra, por lo que la potencia de salida no es proporcional a la de entrada y el cambio de fase no es proporcional al índice de refracción.

Los principales efectos no lineales son:

- El efecto de la *Dispersión Raman Estimulada* (SRS, según sus siglas en inglés) no es significativo para potencias por debajo de un cierto valor umbral, dependiente del área efectiva de la fibra, y de la longitud efectiva de la misma. Produce una transferencia de potencia de longitudes de onda menores a mayores y da lugar a un fonón óptico. Este efecto se aprovecha para hacer amplificadores ópticos.



- La *Dispersión Brillouin Estimulada* (SBS según sus siglas en inglés) aparece a potencias menores que la Dispersión Raman (en torno a 1 mW a 1550 nm), pero su efecto se da en una anchura espectral muy pequeña (10 MHz) en comparación con la anchura del espectro de los pulsos, por lo que no sufren grandes pérdidas.
- La *Automodulación de Fase* (SPM según sus siglas en inglés) es otro efecto no lineal, debido al llamado efecto Kerr, por el cual el índice de refracción que experimenta el modo fundamental en una fibra depende débilmente de la potencia que transporta. Por ello, al propagarse un pulso de suficiente potencia experimenta un cambio de fase proporcional a dicha potencia. Cambia la fase instantánea, es decir, la SPM genera un *chirp* (una automodulación) que depende de la forma del pulso a la entrada.
- La *Modulación Cruzada de Fase* (XPM según sus siglas en inglés), que también depende del efecto Kerr y se da en sistemas WDM, donde el índice de refracción de cada canal se ve afectado y es dependiente de la potencia del resto de canales, lo que produce un cambio de fase (*chirp*) al propagarse por la fibra. La interacción entre canales depende de la velocidad de propagación relativa, por lo que depende de la dispersión y cuanto más grande sea ésta, menor será el efecto de la XPM.
- El *Mezclado de Cuatro Ondas* (FWM según sus siglas en inglés) depende también del efecto Kerr y también se da en sistemas WDM, lo que genera nuevas ondas ópticas a frecuencias producto de la combinación de tres componentes de un mismo sistema (sumas o restas,  $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ ). La energía que se transfiere a esas nuevas longitudes de onda se traduce en una pérdida de potencia en los canales principales y en diafonía.

### 1.3.-Sensores ópticos

Un sensor se puede definir como la combinación de un dispositivo transductor, un canal de comunicaciones y un subsistema para generar y/o detectar, tratar, procesar y acondicionar la señal. Todos estos elementos pueden estar, o no, integrados. Si se emplea la luz en cualquiera de estos subsistemas, el sensor se denomina “*sensor fotónico*” o más comúnmente “*sensor óptico*”, donde el transductor es el subsistema que determina y caracteriza el sensor [2].

En general, un sensor óptico es un sistema fotónico en el que la magnitud medida modifica o modula alguna de las características de la luz en el sistema. Tras detectar, procesar y acondicionar la señal, el sistema mostrará a su salida, normalmente en el dominio eléctrico, una señal de salida representando la magnitud medida.

### 1.3.1.-Tipos de sensores ópticos

Los diferentes tipos de sensores ópticos se pueden clasificar de distintas formas, en base a diferentes criterios:

- *Dominio y tipo de la magnitud*
  - Mecánica: Vibraciones, fuerza, presión...
  - Térmica: La temperatura puede medirse dada su dependencia al espectro de emisión, absorción, índice de refracción, etc., de distintos materiales.
  - Electromagnética: Los campos eléctricos y magnéticos pueden ser medidos empleando efectos electro-ópticos, magneto-ópticos y efectos Faraday.
  - Radiación: La radiación nuclear produce efectos luminiscentes o fluorescentes en materiales fotónicos, los cuales son medibles.
  - Composición química: Se emplea la modificación de la radiación lumínica debida a la concentración de diferentes compuestos químicos.
  - Flujos de fluidos: La dispersión y la absorción provocada por partículas en suspensión son, entre otras, las técnicas empleadas para la medición.
  - Magnitudes biomédicas: Diferentes concentraciones de elementos biológicos, como el oxígeno, flujo sanguíneo, etc.
- *Distribución espacial de la magnitud*
  - Puntual: Cuando la medida se realiza de forma discreta mediante diferentes canales. Cada sensor detecta un único punto.
  - Integrada: Cuando el resultado de múltiples medidas se integra en una única variable.
  - Distribuida: La medida se realiza a lo largo de una línea, obteniendo resolución espacial en la misma.
  - Cuasi-distribuida: Empleando técnicas de multiplexación, permite la medida de múltiples puntos empleando un mismo sensor.
- *Naturaleza de la transducción*
  - Intrínseca: Aquellos sensores en los cuales transductor y el canal de comunicaciones o guía de onda son el mismo.
  - Extrínseca: Aquellos en los que la interacción entre la luz y el objeto a medir se produce en un dispositivo óptico externo y la luz modulada viaja a través de otra guía de onda.
- *Modulación de la luz*
  - Modulación de amplitud o intensidad: En ellos, la magnitud a medir modifica la intensidad óptica transmitida por la fibra. Requieren fuentes de luz incoherentes y más baratas.

- Fase o interferométricos: La magnitud medida modula en fase la radiación lumínica en el transductor. Este tipo de sensores requieren fuentes de luz coherentes, fibras monomodo y controladores de la polarización, como fibras PM (*Polarization-maintaining*), lo que incrementa los costes.
- Polarimétricos: Sensores en los cuales la variable medida modula la polarización de la luz.
- Espectroscópicos: Sensores en los cuales la magnitud medida modula el espectro de la radiación óptica.
- *Tecnología de fabricación del transductor*
  - Fibra óptica: aquellos donde los dispositivos ópticos (como las guías de onda) son fibras ópticas y los sensores están hechos con ésta tecnología.
  - Óptica integrada
  - Opto-electrónica integrada: sensores en los que se combinan elementos ópticos y eléctricos para generar, detectar o tratar la señal.
  - Óptica híbrida: aquellos que combinan partes ópticas y eléctricas empleando diferentes tecnologías (Fibra o Integrada).

### 1.3.2.-Estabilidad y “drift”

En un sensor es muy importante que la señal de salida sea muy estable, ya que en función de la propiedad óptica que se quiera emplear para la medición, una inestabilidad puede dar lugar a una medida errónea. Dado que una estabilidad perfecta es rara vez alcanzable, se define el término “*drift*”, siendo éste un concepto contrario a la estabilidad: expresa cuánto de inestable es un sensor. Cuanto menor sea el “*drift*”, más precisas serán las medidas tomadas por el sensor. Este valor puede ser expresado cuantitativamente midiendo la señal a la salida del sensor y comparándola con la señal que idealmente se debería obtener:

$$Drift = \left[ \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{out,ideal}} \right] \cdot 100 \text{ (en \%)} [2]$$

Esta variación es muy dependiente del entorno, por lo que se debe indicar las condiciones de operación del sensor, así como el lapso de tiempo de medida.

### 1.3.3.-Sensores ópticos comerciales

Desde los primeros atisbos de uso de los sensores ópticos hasta la actualidad, el empleo de éstos ha sufrido un importante incremento en el desarrollo de aplicaciones comerciales, pese a que su introducción al mercado ha sido muy discreta, al contrario que su aplicación para las comunicaciones. Aun así, sus grandes ventajas frente a los tradicionales sensores aseguran un continuo desarrollo de los mismos.

#### *1.3.3.1.-Sensores de Temperatura*

La temperatura ha sido la aplicación comercial principal de los sensores ópticos desde su aparición en el mercado, incorporando sensores puntuales y distribuidos, así como multitud de mecanismos de transducción. Recientemente, dispositivos basados en cavidades Fabry-Perot y en redes de difracción de Bragg se están comenzando a implementar.

#### *1.3.3.2.-Sensores de Presión*

Numerosas técnicas de transducción han sido empleadas para sensores de presión de fibra óptica, pero pocos se introdujeron en el mercado en las primeras etapas como sí lo hicieron los primeros sensores de temperatura, debido a la diversidad de requerimientos para los diferentes sensores de presión. Sin embargo, los últimos sensores sí que parecen estar teniendo éxito en el sector del automóvil, para la monitorización de la maquinaria.

#### *1.3.3.3.-Sensores de Tensión*

Con la aparición de las redes de difracción de Bragg, su intenso estudio y desarrollo derivaron en su empleo comercial para sensores de tensión y temperatura, debido a su barata fabricación. Además, numerosos estudios han descrito sus buenas propiedades para la medida de diferentes magnitudes, como campos eléctricos, sensores químicos o campos acústicos.

#### *1.3.3.4.-Sensores de desplazamiento*

La medida del desplazamiento puede realizarse usando diferentes técnicas, siendo las dos principales aquellas basadas en la triangulación, la cual requiere espacio libre, por lo que no es compatible con fibra óptica, y los sensores basados en una tecnología similar a la empleada por los sensores ópticos de proximidad (una célula fotodetectora y fibra óptica).

### **1.4.-Dispositivos ópticos**

Con la aparición de los dispositivos ópticos se solventaron las limitaciones de velocidad de los dispositivos eléctricos anteriormente empleados y permitieron el tratamiento y amplificación de las señales ópticas sin necesidad de transformarlas al dominio eléctrico.

### 1.4.1.-Acopladores

Los acopladores son los componentes ópticos más empleados en comunicaciones y en redes de sensores de fibra. Están disponibles en multitud de formas, con diferente número de puertos y fabricados con distinto tipo de fibras, desde fibra monomodo (incluyendo fibras mantenedoras de la polarización), fibras multimodo e incluso guías de onda planas.

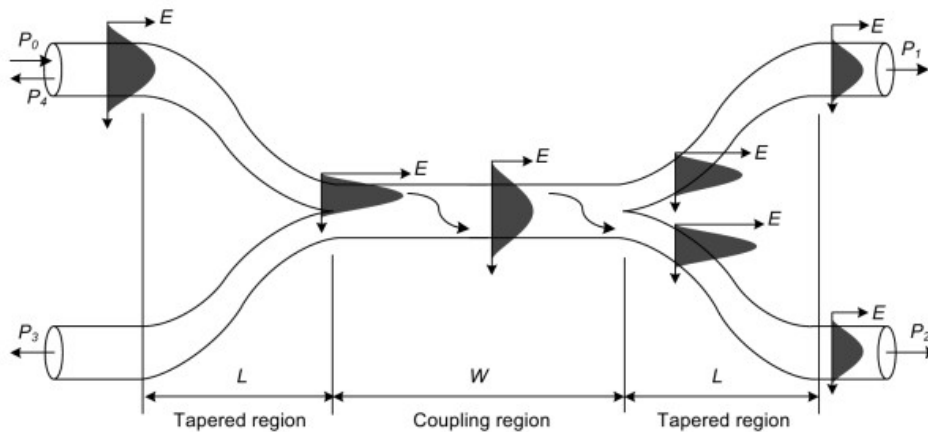


Figura 1.4. Esquema de un acoplador de 4 puertos [1]

Estos dispositivos tienen muchas aplicaciones interesantes, como la división de potencia óptica, la multiplexación o demultiplexación en longitud de onda, divisores de polarización, etc.

Su principio de funcionamiento se basa en el fenómeno óptico de acoplamiento de campos evanescentes, el cual aprovecha el hecho de que el campo modal del modo guiado se extiende más allá del revestimiento (de ahí su nombre), por lo que cuando dos núcleos de fibra están lo suficientemente cerca de tal forma que sus campos modales se solapan, los modos de las dos fibras se acoplan y, periódicamente, se transfiere potencia entre ambas fibras. Son sensibles a la dirección de propagación de la luz, aunque la gran mayoría son bidireccionales [4-5].

### 1.4.2.-Atenuadores ópticos

Ya sea para proteger los equipos o para proporcionar más estabilidad al sistema, los atenuadores ópticos son unos dispositivos empleados para introducir ciertas pérdidas. Dependiendo de si sabemos la atenuación necesaria o no, se emplea un atenuador fijo o un atenuador variable. El primero proporciona una atenuación determinada y precisa, mientras que el variable, proporciona un rango de atenuaciones no tan precisas, pero obtenemos versatilidad a cambio, en el caso en el que no sepamos la atenuación necesaria.

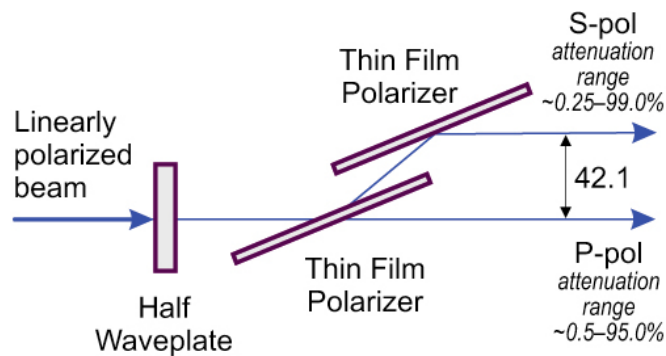


Figura 1.5. Esquema de un atenuador variable para luz polarizada

Los atenuadores variables emplean numerosas técnicas para introducir pérdidas, dependiendo de la aplicación de uso. La más común consiste en un tornillo micrométrico que comprime la fibra que lo atraviesa, introduciendo esas pérdidas en función de la compresión. Existen otras técnicas, tales como desalinear dos segmentos de fibra o empleando un actuador eléctrico para controlar esas pérdidas.



Figura 1.6. Atenuador variable mecánico

### 1.4.3.- Aisladores

Los láseres son muy sensibles a las reflexiones, por lo que es necesario protegerlos de las mismas. Para ello se emplean los aisladores, componentes que permiten la propagación de la luz en una única dirección.

Generalmente estos dispositivos se basan en el funcionamiento de otro dispositivo óptico llamado “rotador de Faraday”, el cual se aprovecha del Efecto Faraday, de ahí su nombre, por el cual y debido al material magneto-óptico del que está construido, cambia la polarización de la luz que lo atraviesa.

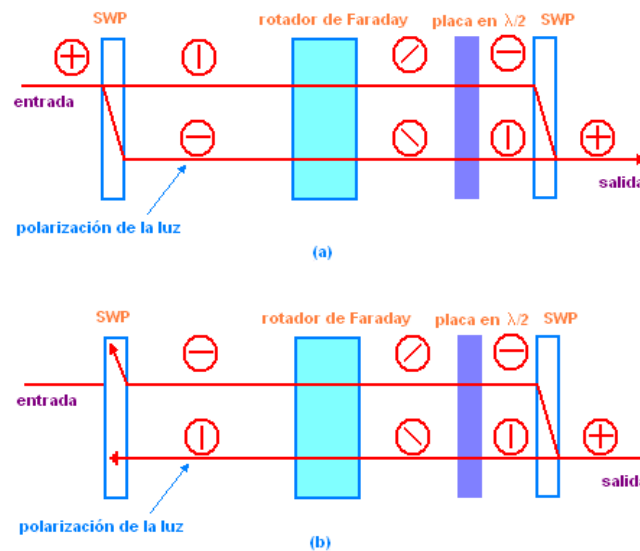


Figura 1.7. Esquema de un aislador óptico independiente de la polarización

El *Spatial Walk-Off Polarizator* (o SPW según sus siglas en inglés) desvía la polarización horizontal unos grados y tras atravesar ambas polarizaciones el rotador de Faraday, atraviesan también una lámina  $\lambda/2$ , la cual también gira la polarización  $45^\circ$  pero el sentido de la rotación depende de la dirección de propagación. Tras la lámina, otro SWP combina las señales en la salida.

En el caso contrario, el último SWP desvía las señales de tal forma que no llegan a alcanzar el puerto de entrada.

#### 1.4.4.-Controladores de polarización

Los controladores de polarización son un tipo de dispositivo óptico que permite, de forma manual o automática, modificar el estado de polarización de la luz. Están compuestos de tres placas, en las cuales se enrolla la fibra con un número determinado de lazos.

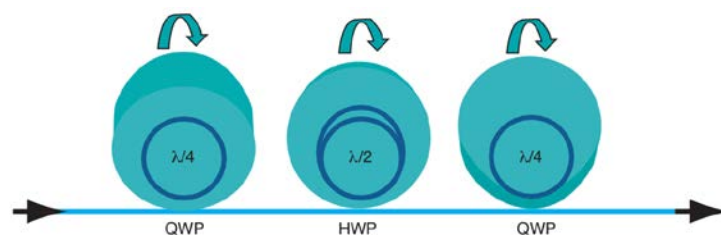


Figura 1.8. Controlador de polarización [1]

Como se puede observar en la figura, el número de vueltas de cada segmento de fibra varía para conseguir la longitud requerida. Para cierta longitud de onda, y con un determinado diámetro de cada placa, se producen cambios de fase en el campo óptico debido a la tensión, por lo que se introduce birrefringencia, definida por:

$$\Delta n = \alpha \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

Donde  $\alpha$  es un parámetro que depende del material del que está formado la fibra,  $r$  es el diámetro del revestimiento de la fibra y  $R$  es el diámetro de la placa, definido como:

$$R = \frac{8\pi\alpha r^2}{\lambda}$$

Para un campo óptico incidente, a la salida de la primera placa sufre un cambio de fase de  $90^\circ$ . La última placa tiene el mismo comportamiento. La segunda placa es un retardador de  $\lambda/2$ , ya que la fase del campo óptico ha sufrido una variación de  $180^\circ$ . El cambio de fase puede expresarse como:

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot \Delta n \cdot 2\pi \cdot R$$

Si asumimos que el campo óptico tiene un estado de polarización elíptico, el efecto del retardo de  $\lambda/4$  de la primera placa es el de cambiar el estado de polarización a un estado lineal. El retardo de  $\lambda/2$  rota el estado de polarización hacia una dirección específica y, finalmente, la última placa cambia el estado de polarización lineal al deseado.

Este dispositivo será muy importante para obtener el estado de “*Mode-locking*”, ya que el estado de polarización es un parámetro crítico.

#### 1.4.5.-Multiplexor por división en longitud de onda (WDM)

Los multiplexores por división en longitud de onda o WDM (por sus siglas en inglés, *Wavelength Division Multiplexer*) son dispositivos pasivos, cuya configuración más simple consta de 3 puertos: 2 de entrada y uno de salida, pese a que los hay con más puertos de entrada. Generalmente son bidireccionales, por lo que pueden cumplir la función de multiplexor, cuando por los puertos 1 y 2 se introducen dos señales con distintas longitudes de onda y tenemos a la salida la combinación de ambas; o demultiplexor, cuando introducimos una señal por el puerto 3 y obtenemos en las salidas 1 y 2 las señales separadas.



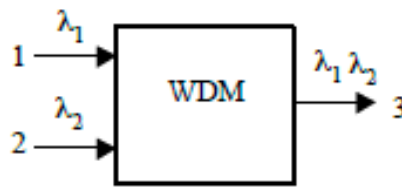


Figura 1.9. Esquema de un WDM de 3 puertos

#### 1.4.6.-Redes de difracción de Bragg

Las redes de difracción de Bragg son una estructura fotónica en fibra óptica que actúa como filtro rechazo banda estrecho. Como característica especial, estos elementos reflejan la banda rechazada en dirección de contra-propagación. Los FBGs pueden utilizarse como sensores debido a la sensibilidad en longitud de onda a la deformación y la temperatura. Estos se clasifican como sensores de fibra óptica intrínsecos, simples, versátiles y de pequeño tamaño que son inscritos directamente en la fibra de sílice. Consecuentemente, tienen todas las ventajas atribuidas a los sensores de fibra óptica: eléctricamente pasivos, inmunidad a ondas electromagnéticas, alta sensibilidad, bajo precio, buena linealidad y resistencia a entornos adversos. También, debido a que la información de la información está codificada en la frecuencia de resonancia de la estructura (parámetro absoluto), estos dispositivos son autoreferenciados y pueden ser multiplexados fácilmente.

Una red de difracción de Bragg es un tipo de reflector Bragg distribuido, construido en un segmento corto de fibra óptica que refleja longitudes de onda particulares y transmite el resto. Esto se logra creando una variación periódica del índice de refracción en el núcleo de la fibra, creado mediante la exposición del núcleo a un patrón de interferencia óptico. Dependiendo de la modulación presente en el índice de refracción, se distinguen diferentes tipos de redes de difracción de Bragg:

- *Fiber Bragg grating (FBG)*
- *Long-period fiber grating (LPG)*
- *Phase-shifted fiber Bragg grating (PS-FBG)*
- *Chirped fiber grating*
- *Tilted fiber grating*
- *Sampled fiber grating*

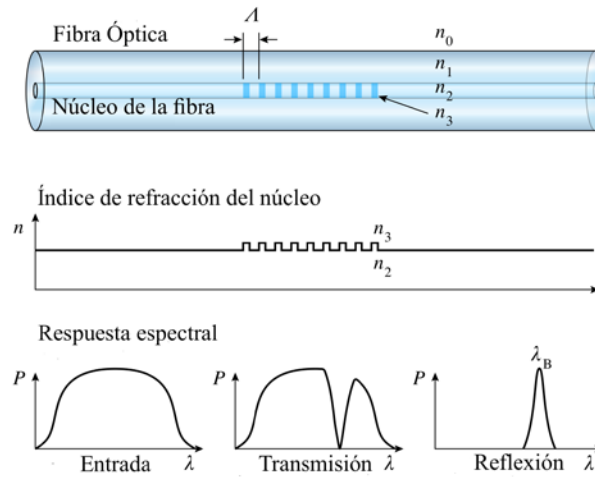


Figura 1.10. Ilustración esquemática de una Red de Difracción y su funcionamiento [1]

El principio fundamental de operación de un FBG es la reflexión de Fresnel, donde la luz que está viajando por el medio con diferentes índices de refracción se refleja y refracta en la interfaz. El índice de refracción suele alternarse dentro de una longitud definida. La longitud de onda reflejada ( $\lambda_{Bragg}$ ), denominada longitud de onda de Bragg y queda definida mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_{Bragg} = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda$$

donde  $n_{eff}$  representa el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y  $\Lambda$  es el periodo del índice de modulación refractivo. El índice de refracción adecúa la velocidad de propagación de la luz respecto a la velocidad de la luz en el vacío. Por lo tanto  $n_{eff}$  depende de la longitud de onda, pero también del modo de propagación de la luz.

La ecuación de Bragg revela las características de este tipo de estructuras. Cualquier perturbación que modifique el índice de refracción o el periodo provocará un cambio en  $\lambda_{Bragg}$ . De esta forma, las redes de difracción Bragg pueden ser consideradas como un transductor óptico intrínseco que cambia el espectro de la luz reflejada. Como la longitud de onda es un parámetro absoluto, este proceso es insensible a otras variaciones de los parámetros de la luz (como son la intensidad, la fase y la polarización) a lo largo del sistema óptico. Esta característica, en conjunto con la capacidad de multiplexación, ha dado a los FBGs una gran importancia en el dominio de sensores ópticos.

## 1.5.-Amplificadores ópticos

Los amplificadores ópticos vienen a solventar el problema de tener que convertir primero la señal óptica al dominio eléctrico para amplificar esta y volver a convertir al dominio óptico, sino que amplifican directamente la señal óptica.

La amplificación óptica es el proceso por el cual se incrementa la potencia de una señal óptica manteniendo el resto de sus características sin necesidad de realizar reconversiones optoelectrónicas. Se trata de un elemento fundamental en el desarrollo de estructuras tales como los láseres de fibra.

Existen dos ventajas básicas en los amplificadores de fibra óptica, respecto a los amplificadores convencionales. La primera es que la potencia de bombeo necesaria es mucho menor, debido a que esta se distribuye en una zona de unas pocas micras ( $\mu m$ ) en el interior de la fibra, por lo que se consigue más fácilmente la intensidad de bombeo necesaria para la amplificación. Y, en segundo lugar, que la fibra óptica puede enrollarse fácilmente, ocupando poco volumen, lo que permite utilizar amplificadores muy largos, para conseguir la máxima ganancia compatible con la potencia de bombeo utilizada.

En la actualidad existen tres tipos básicos de amplificadores de fibra óptica: los de núcleo dopado con iones de tierras raras, los de dispersión Brillouin estimulada y los de dispersión Raman estimulada.

### 1.5.1.-Amplificadores de fibra dopada con tierras raras

Los amplificadores de fibra dopada se obtienen al dopar el núcleo de las fibras ópticas con iones de materiales pertenecientes al grupo de las tierras raras ( $Er^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$ ). La elección del dopante dependerá de la longitud de onda sobre la que se quiera obtener la amplificación. Para el rango de 1.280 a 1.340 nm se utilizan iones de Praseodimio ( $Pr^{3+}$ ), para la ventana de 1.450 a 1.520 nm iones de Tulio ( $Tm^{3+}$ ) y finalmente para el rango de 1.500 a 1.600 nm se utilizan iones de Erblio ( $Er^{3+}$ ).

Estos últimos son los más utilizados dada la baja atenuación que proporciona la 3ª ventana en comunicaciones ópticas. Se han realizado estudios para el desarrollo y optimización de amplificadores en las tres ventanas.

El medio activo del amplificador es el núcleo dopado de la fibra. La inversión de población se consigue mediante el bombeo óptico a longitudes de onda concretas, provocando que los iones del medio dopante pasen de un estado fundamental a otro excitado, consiguiendo así la emisión estimulada.

Dicha inversión de población que se va produciendo a lo largo de la fibra, va a su vez debilitando la intensidad de bombeo, llegando a hasta un punto que este comienza a ser incapaz de producirla. Este fenómeno condiciona la longitud que debe tener la fibra, llamada longitud óptima, para no desaprovechar su capacidad de amplificación, si se hace más corta, y evitar que parte de la fibra sea absorbente, si se hace más larga.

Otro aspecto importante para optimizar un amplificador óptico, es la influencia de la concentración del dopante. Parece más razonable (por problemas de espacio) utilizar fibras cortas altamente dopadas, que fibras largas débilmente dopadas. Pero esto no es válido, ya que cuando se tienen altas concentraciones se provocan interacciones entre los iones dopantes, que dejan de excitarse y se destruye la inversión de población, lo que disminuye la eficiencia del amplificador. Debido a esto, se suelen usar fibras amplificadoras largas (de varios metros de longitud normalmente) y con baja concentración de dopante.

### 1.5.2.-Amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA)

Los amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFA) son uno de los tipos de amplificadores más empleados para la amplificación de señales en 3ª ventana, debido a su buena relación entre ganancia y potencia de bombeo (en torno a 40 dB para potencias de bombeo relativamente bajas, en torno a decenas de mW).

En la siguiente figura se muestra el diagrama de los niveles de energía del erbio y las longitudes de onda de bombeo necesarias para alcanzarlos.

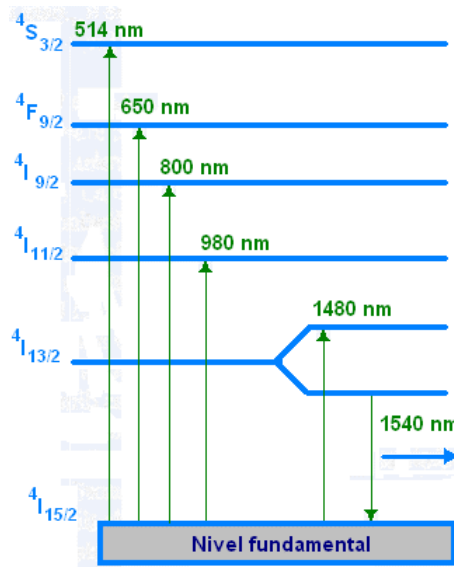


Figura 1.11. Niveles de energía del Erblio [1]

Como se aprecia en la representación anterior, la amplificación se da en el salto del último estado (entro los niveles de energía  $4I_{13/2}$  y  $4I_{15/2}$ ). Hay diferentes longitudes de bombeo, pero por diversos motivos las dos más utilizadas y más eficientes son: 980 y 1.480 nm. Con el fin de conseguir estabilidad en la potencia y en la longitud de onda emitidas, se requiere el control de la corriente de alimentación y de la temperatura de los láseres emisores. Esto último se lleva a cabo mediante refrigeradores que operan por efecto Peltier. Para ayudar en la estabilización de la longitud de onda, suelen usarse también redes de Bragg de fibra óptica.

En la siguiente figura se muestra el esquema básico para el bombeo de un EDFA. El bombeo (a 980 nm en este caso) se introduce mediante un multiplexor en longitud de onda (WDM) permitiendo de esta forma combinar la señal a amplificar con el bombeo que excitará a los iones de Erbio.

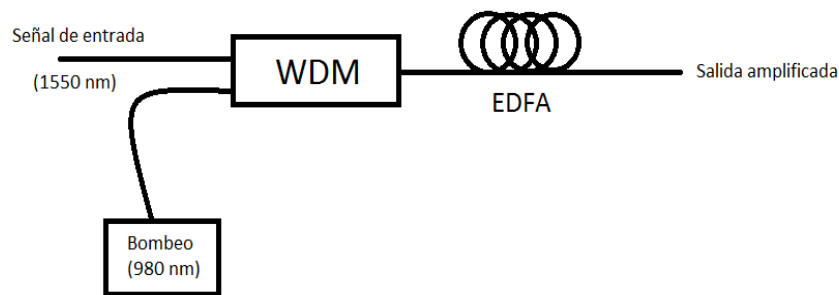


Figura 1.12. Esquema del bombeo de un EDFA

### 1.5.3.-Ganancia en los EDFA

Hay que tener en cuenta que la optimización de la ganancia depende de la longitud óptima de la fibra y de la dependencia de esta con parámetros como: la longitud de onda, la potencia del bombeo y la señal.

Al aumentar la potencia del bombeo conseguiremos invertir la población en un trozo de fibra más larga, aumentando así la longitud óptima de esta. Si estamos trabajando en longitudes de onda donde el bombeo es más eficiente y es absorbido más rápidamente a lo largo de la fibra, la longitud óptima es menor. Y por último si aumenta la potencia de la señal, se provocan más emisiones estimuladas, lo que implica disminuir la inversión de población y, por tanto, se acorta la longitud óptima (menos ganancia, pero más potencia de salida).

Al variar la longitud de onda, varía la probabilidad de emisión estimulada y como consecuencia lo hace la ganancia, de forma que cuando estas son mayores, la inversión de población se reduce y a su vez lo hace la longitud óptima de la fibra.

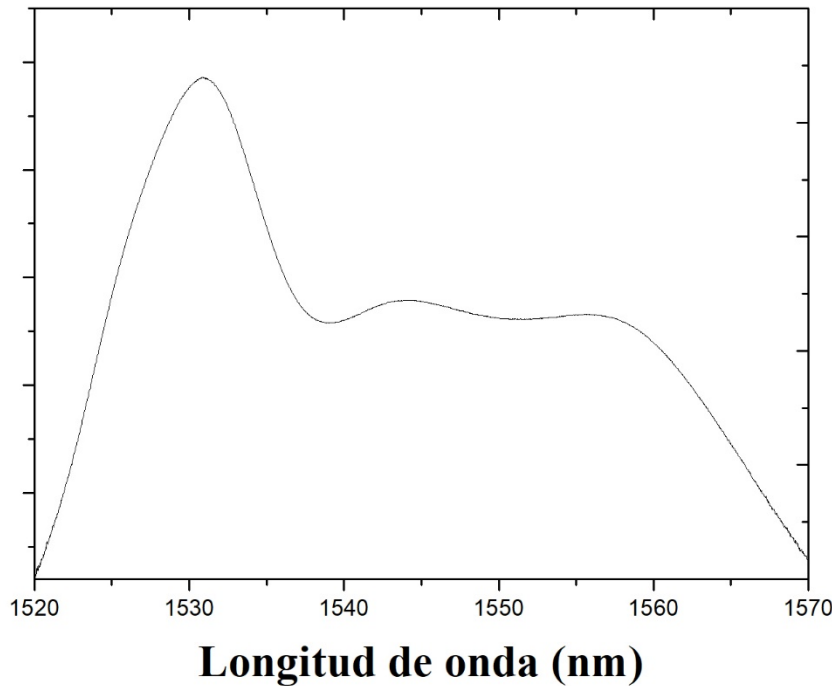


Figura 1.13. Curva típica de ganancia de un EDFA con bombeo de 980 nm

## 1.6.-Cavidades ópticas

Las cavidades ópticas (también llamadas “resonadores ópticos”) son un tipo de dispositivo formado por varios componentes ópticos que permiten que un rayo de luz permanezca confinado en su interior gracias a reflectores.

La forma más fácil de realizar una cavidad óptica consiste en colocar dos espejos planos o esféricos frente a frente y separados por una distancia  $L$ . Sin embargo, existen otro tipo de cavidades. Las configuraciones más utilizadas son: las cavidades Fabry-Perot o cavidades lineales y las cavidades en anillo. La principal diferencia entre ellas es el camino que recorre la luz: mientras que en las cavidades Fabry-Perot la luz viaja entre dos espejos situados al final de cada extremo de la fibra, en las cavidades en anillo la luz viaja en diferentes direcciones. Por tanto, la longitud de resonancia de una cavidad Fabry-Perot es dos veces la distancia entre sus reflectores mientras que en una cavidad en anillo corresponde a la longitud de éste.

Los láseres basados en cavidades Fabry-Perot pueden constituirse colocando un medio de ganancia entre dos espejos altamente reflectantes. Sus principales ventajas son su simplicidad y la posibilidad de hacer cavidades muy cortas. Las cavidades lineales son ideales para hacer láseres compactos de un solo modo longitudinal y para aplicaciones de alta potencia. Pero esta aproximación tiene varias limitaciones como la eficiencia y un gran ancho de línea a la salida.

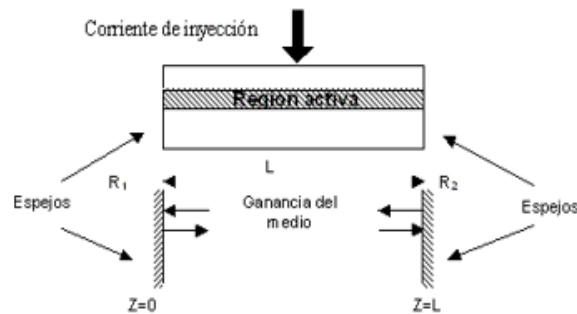


Figura 1.14. Esquema de una cavidad Fabry-Perot [1]

Los láseres con cavidades en anillo son topologías extremadamente simples que no necesitan de espejos, resultando en cavidades realizadas solo de fibra. Normalmente, los láseres con cavidades en anillo usan la ganancia que proporciona el medio de ganancia de una forma más eficiente y tienen un rango espectral dos veces mayor para una misma longitud de cavidad en comparación con las cavidades lineales. Sin embargo, pueden sufrir fluctuaciones de potencia.

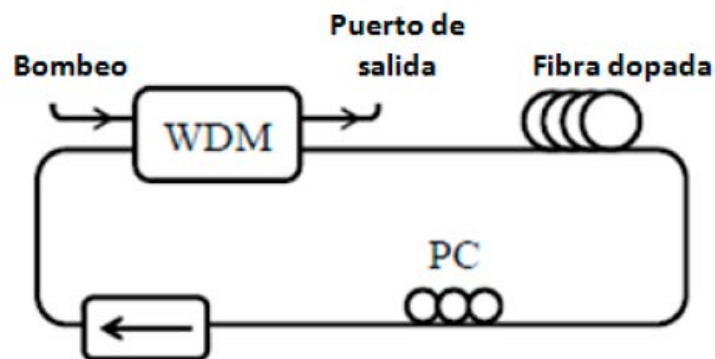


Figura 1.15. Esquema de una cavidad en anillo unidireccional

### 1.7.-Método de láseres enganchados en fase (*Mode Locking*)

El método de láseres enganchados en fase es uno de los más empleados en la actualidad para la generación de pulsos en el dominio óptico.

Partiendo de un láser con cavidad Fabry-Perot, cuyo espectro está compuesto por varias componentes espectrales separadas entre sí  $\frac{c}{2nL}$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $n$  el índice de refracción del medio y  $L$  la longitud de la cavidad

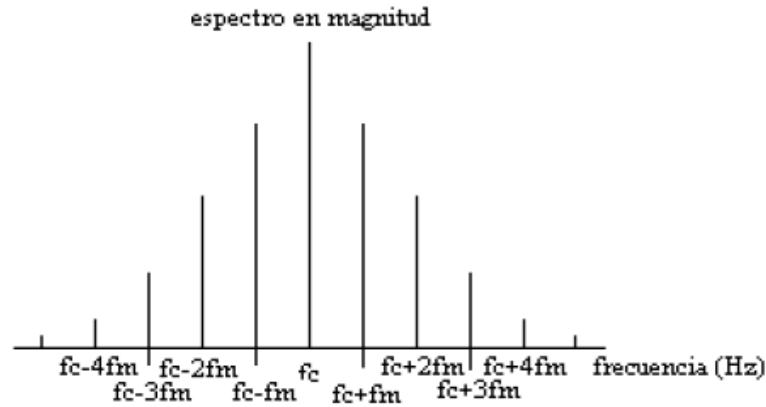


Figura 1.16. Modos longitudinales del espectro de un láser Fabry Perot.

En un láser simple, cada uno de los modos oscila independientemente con amplitudes y fases aleatorias. La fase individual de cada modo longitudinal no es fija y puede variar aleatoriamente debido a cuestiones como variaciones térmicas en los materiales del láser. En láseres con solo unos pocos modos de oscilación, la interferencia entre los distintos modos puede causar interferencias constructivas y destructivas lo que puede causar a la salida pulsos de luz. Sin embargo, en la mayor parte de los láseres donde existen cientos de modos, la superposición de todos ellos tiende a producir una señal cuya potencia óptica es constante, de tal manera que no se producen pulsos ópticos a la salida.

El origen de estas componentes espectrales más o menos discretas, se debe a que sólo las componentes que se suman en fase a la salida de un láser Fabry Perot salen de la cavidad, es decir aquellas que verifican:

$$L = m \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Donde  $L$  es la longitud de la cavidad,  $\lambda$  es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia central de oscilación del láser y  $m$  es un número entero que identifica al modo longitudinal. Pero, además, la oscilación láser sólo ocurre para las longitudes de onda que están dentro de la región activa del láser, es decir, dentro del ancho de banda del medio activo. Por lo tanto, a la salida del láser estarán presentes aquellos modos que cumplan simultáneamente las dos condiciones anteriores.

Además, la potencia óptica de salida del sistema depende de la relación ganancia-pérdidas de la cavidad. Mientras la relación no supere cierto umbral, llamado umbral de emisión láser, no se producirá la suficiente ganancia o inversión de población en el medio activo para que la emisión estimulada domine sobre la espontánea. Siendo esta una emisión indeseada que es fuente del ruido ASE (*emisión espontánea amplificada*).



Para ganancias menores que la umbral, ninguna componente espectral tiene la potencia suficiente para superar el umbral que da paso a la emisión estimulada por lo que todas las componentes se producen a raíz de emisión espontánea. Si continuamos aumentando la ganancia, cada componente espectral tendrá cada vez más potencia y llegará un momento en el que la potencia de la componente espectral fundamental superará la potencia umbral. En esta situación, dicha componente se generará de forma propia mediante emisión estimulada, no así las otras componentes espectrales que todavía se generarán de forma espontánea.

Para obtener pulsos de la menor duración posible es necesario que exista una fase fija entre cada modo y que esté relacionada con la fase de los demás modos, de manera que estén en fase entre ellos. De esta forma, los modos del láser interferirán periódicamente de forma constructiva y destructiva entre ellos, lo que producirá pulsos de luz a la salida del láser. En esta situación se dirá que el láser está enganchado en fase.

La duración de los pulsos está determinada por el número de modos que están oscilando en fase. A mayor número de modos, mayor será el ancho de banda y más estrechos temporalmente serán estos pulsos. En la práctica, la duración de los pulsos también depende de factores como la forma del pulso o la dispersión dentro de la cavidad.

Para alcanzar este estado, hay dos tipos de métodos: el enganche activo y el enganche pasivo. El primero, como su propio nombre indica, emplea una señal externa para producir una modulación de la señal en el interior de la cavidad. El pasivo, no emplea ninguna señal externa, sino que usa algún tipo de elemento (en nuestro caso, el *Saturable Absorber Mirror*, o SAM según sus siglas en inglés) para producir una automodulación en la amplitud de la luz.

#### **1.7.1.-Enganche de fase activo**

De los dos, es el método más usado. Consiste en modular la amplitud de la señal en el interior de la cavidad. Para ello suele colocarse un modulador externo dentro de la cavidad. De esta forma se modula la ganancia del medio activo de forma sinusoidal lo que hace que haya momentos en que la potencia de salida es máxima y otras en que es mínima. Es decir, en realidad se está modulando la potencia óptica de salida de la señal, lo que equivale a decir que se está modulando en amplitud el campo eléctrico a la salida.

Si la moduladora es una señal sinusoidal, aparecen en el espectro dos componentes con fase 0 a cada lado de la portadora. Como en este caso la modulación se produce sobre la potencia óptica, en el campo eléctrico de la señal de salida, también se producirá una modulación en amplitud, pero su espectro (en campo eléctrico) tendrá varias componentes espectrales (debido a la relación cuadrática entre campo eléctrico y potencia óptica asociada) en torno a la portadora y equiespaciadas a una frecuencia igual a la frecuencia moduladora. La señal se irá realimentando sucesivamente y, en cada paso por el modulador externo, se irán modulando en amplitud cada una de las componentes espectrales lo que se traducirá en un reparto de la potencia óptica mucho más equitativo que antes de modular la señal.

Dicho de otro modo, habrá aumentado el ancho de banda de la señal óptica de salida y, además, gracias a la modulación de amplitud, se habrá conseguido forzar a que las fases de las componentes espectrales sean cero. En esta situación, las componentes espectrales estarán en fase, por lo que a la salida del láser se producirán pulsos ópticos.

Para conseguir que los pulsos a la salida sean más perfectos, se recurre en ocasiones a colocar un *absorbente saturable* óptico. El funcionamiento básico de este dispositivo es el siguiente:

Cuando la ganancia es muy alta, este dispositivo no es capaz de absorber toda la potencia que le llega (el dispositivo se satura) y la deja pasar, mientras que cuando dicha potencia no es muy alta, entonces el dispositivo sí que es capaz de absorber la potencia que le llega y no la deja pasar.

El aspecto más crítico en este dispositivo consiste en conseguir que a todas las componentes espectrales tarden lo mismo recorrerla cavidad. Esto es así ya que el propio índice de refracción depende de la frecuencia de la componente que lo atraviesa con lo que cada una de ellas experimenta una velocidad distinta. Esto produce que, además de la modulación en amplitud, se produzca una pequeña automodulación en fase.

### **1.7.2.-Enganche de fase pasivo**

Son técnicas que no requieren de un modulador o una señal externa para producir pulsos. Su funcionamiento básico se basa en emplear una estructura láser que no alcance el umbral de emisión láser, es decir, que la emisión espontánea predomine sobre la estimulada. La potencia óptica media de salida es constante y dependiente de la corriente de polarización, pero la potencia instantánea es de carácter aleatorio (debido a la emisión espontánea) de tal modo que en algunos instantes alcanzará unos picos (máximos).

Colocando un absorbente saturable óptico antes del módulo que proporciona la ganancia, el dispositivo se saturará en los máximos de potencia, por lo que dejará pasar la potencia mientras que, en el resto de tiempo, la potencia óptica no superará el umbral de saturación y la señal será absorbida. Por tanto, a la salida aparecerá un pulso óptico que se irá amplificando cada vez que pase por el absorbente, produciéndose cada vez un pulso óptico con mayor potencia. En este caso, se está produciendo una modulación óptica pasiva.

Sin embargo, dado que no se modula la señal de forma externa, la polarización de la luz será aleatoria y será necesario controlarla para mantener el estado de enganche de fase estable. Para ello se pueden emplear fibras mantenedoras de la polarización, lo que incrementa el coste del diseño, o un controlador de la polarización, de forma que, a la salida del mismo, la polarización sea la necesaria para que todos los modos se encuentren en fase.

En nuestro diseño emplearemos un controlador de la polarización y un SAM que actuará como absorbente saturable, así como fibra dopada con Erblio, que será el elemento en el interior de la cavidad que nos proporcionará ganancia, siendo alimentado con un láser de bombeo constante a 980 nm.



## CAPÍTULO 2 – SOFTWARE PARA EL INTERROGADOR SI155

### 2.1.-Introducción

En esta primera parte del proyecto se ha desarrollado un software para el control del Interrogador SI155 de *Micron Optics* y para el tratamiento de los datos obtenidos, para facilitar la monitorización de distintos tipos de sensores. Este software permitirá estudiar la potencia óptica que es reflejada por los distintos sensores que se conecten al interrogador [5].

El software se ha desarrollado íntegramente en Matlab, apoyándose en las librerías que proporciona el fabricante para la recepción de datos, añadiendo nuevas funciones y modificando las librerías de modo que sirvan para nuestros propósitos. Se ha escogido Matlab frente a otros lenguajes debido a sus buenas prestaciones para la manipulación de grandes matrices de datos, así como por los *Toolbox* que incluye, lo que facilita la comunicación con el Interrogador. Además, tiene funcionalidades para crear interfaces gráficas (GUI's, por sus siglas en inglés) de forma muy intuitiva, lo que facilita el uso del software en gran medida.

En cuanto al funcionamiento del interrogador, éste emplea un láser estrecho sintonizable como fuente de luz y funciona en reflexión, es decir, la fuente de luz y el detector emplean el mismo puerto, lo que nos permite, dado que el modelo SI155 de *Micron Optics* posee 4 puertos, monitorizar hasta 4 canales simultáneamente. Debido a este tipo de funcionamiento, podemos medir sensores basados en FBG's y otro tipo de sensores, como los interferométricos. Para los primeros, cuando la longitud de onda de la fuente de luz coincida con la del FBG, esa luz será reflejada y obtendremos un máximo en el detector correspondiente a esa longitud de onda. Como se ha explicado en la introducción, la temperatura o una tensión aplicada en el FBG modifica esa longitud de onda característica, por lo que la longitud de onda reflejada en estos casos será distinta. Esto nos servirá para usar los FBG como sensores o redes de sensores.

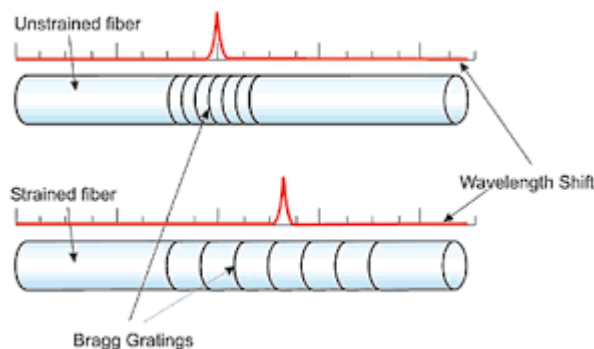


Figura 2.1. Funcionamiento de un FBG como sensor de tensión [9]

Además, el interrogador SI155 permite caracterizar otro tipo de sensores, como son los interferométricos. La forma que tiene para hacerlo es la de detectar la interferencia que producen este tipo de sensores y que también se mide en reflexión. Sin embargo, para emplearlos como sensores se debe observar el desplazamiento de uno de los picos o valles de la interferencia, con la limitación del ancho de banda de medida del interrogador y del que el desplazamiento puede ser varias veces superior.

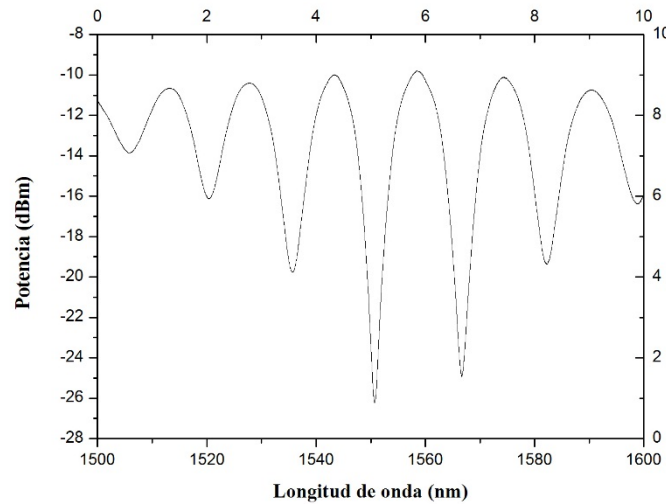


Figura 2.2. Espectro de un interferómetro Sagnac

Para ello, como se explicará más adelante, se emplea una técnica de procesamiento de los datos que involucra la técnica de la FFT, de modo que obtendremos una representación en frecuencia espacial de los datos y podremos caracterizar los sensores observando picos en la magnitud de la FFT y monitorizando la fase correspondiente a esos picos. El parámetro a medir (temperatura, desplazamiento, humedad, etc.) se verá reflejado en los cambios de fase de aquellos puntos de la FFT cuya magnitud sea significativa.

## 2.2.-Desarrollo del software y modo de empleo

Como se ha mencionado con anterioridad, el software para el control del interrogador comercial SI155 de *Micron Optics* ha sido desarrollado íntegramente en el lenguaje de programación M de Matlab. Se ha hecho uso de la herramienta de creación de interfaces gráficas de usuario y del Toolbox de Instrumentación y Control que provee Matlab para facilitar la conexión con el interrogador y la obtención de datos.

### 2.2.1.-Conexión con el interrogador

Lo primero que se ha de realizar es la conexión con el hardware, es decir, el interrogador SI155. Para ello dispone de un puerto Ethernet para crear una conexión TCP/IP que proporciona una mayor velocidad de transferencia de datos, la cual será necesaria dada la gran cantidad de datos que el interrogador proporciona. Para ello, la IP del ordenador y la del interrogador deben estar en la misma red. De otra manera, la conexión no será posible.

La conexión es muy sencilla empleando el Toolbox de Instrumentación de Matlab y las librerías provistas por el fabricante, concretamente empleando la función `hCOMMOpenConnection`. Esta función tiene diferentes opciones en función de los parámetros de entrada, siendo los más importantes:

- **Address:** La dirección IP del interrogador. En este caso será la 10.0.0.55
- **Port:** Aquí tenemos 3 diferentes opciones, dependiendo de cómo queramos emplear el interrogador:
  - **commandPort:** Abre conexión con un puerto específico para enviar comandos al interrogador. Emplearemos éste para configurarlo.
  - **peakStream:** Establece la conexión con otro puerto para tomar medidas de streaming de los picos. En este caso, nosotros no lo emplearemos.
  - **spectrumStream:** Al igual que en el caso anterior, establece conexión con otro puerto específico, en este caso para la visualización en tiempo real (*streaming*) del espectro completo, lo cual es muy útil para nuestra aplicación.

De esta forma abriremos dos conexiones, una para recibir espectros y otra para configurar los parámetros del interrogador. Esta conexión se realiza nada más encender el programa y es automática, por lo que hay que asegurarse que el interrogador esté encendido y conectado al ordenador y que estén ambos en la misma red.

Tras esto, se abrirá la ventana principal del programa y estará listo para usarse.

### 2.2.2-Ventana principal y opciones

La ventana principal del software de control para el interrogador SI155 tiene el siguiente aspecto:

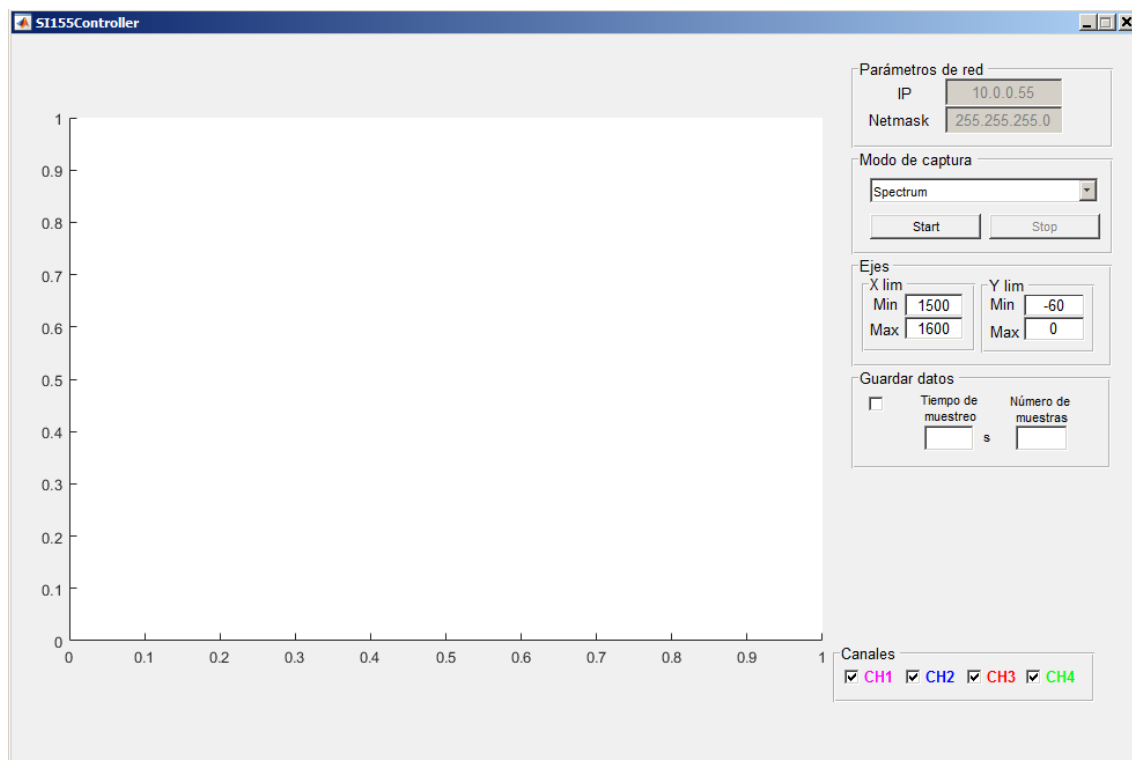


Figura 2.3. Pantalla principal del software

Como se puede observar, el panel consta de una serie de sub-paneles, para modificar los límites de los ejes, para seleccionar el tipo de medida que se quiere realizar, para definir la velocidad y el número de muestras que se quiere tomar o para escoger los canales que se quieren representar. Más adelante se profundizará en cada función.

El software representa en tiempo real las medidas que estamos obteniendo con el interrogador, con la posibilidad de aplicar la FFT y obtener la información en frecuencia espacial para poder monitorizar distintos puntos de la FFT y su fase, de modo que nos resulte más sencillo ver el funcionamiento de distintos tipos de sensores. Además, nos permite realizar la visualización en tiempo real (*streaming*) del espectro o guardar los datos de un número determinado de muestras, pudiendo elegir el intervalo de tiempo entre muestras consecutivas, lo que nos permite realizar medidas muy rápidas (con un intervalo muy pequeño) o medidas de varios días (ampliando el intervalo).



### 2.2.2.1.-Parámetros de red

El submenú “Parámetros de red”, nos indica la dirección IP asociada al interrogador y la máscara de red de nuestro equipo. Para cambiar estos parámetros es necesario modificar el código del programa. Concretamente las líneas 61 y 64. Esto se hace ya que la IP del interrogador va a ser fija. Se está estudiando la opción de hacer un programa más versátil, capaz de comunicarse con distintos modelos de interrogadores comerciales, para lo cual se añadiría una opción para cambiar la IP en el propio programa.

### 2.2.2.2.-Modo de captura

El submenú “Modo de captura” nos permite seleccionar el modo de funcionamiento del software del interrogador. Hay 3 opciones disponibles:

#### Spectrum

El modo “Spectrum” es el modo por defecto del software. Nos representa en tiempo real el espectro óptico obtenido por el interrogador. Además, es la forma de guardar datos por defecto. Esta opción nos permite cambiar y mostrar de 1 a 4 canales del interrogador sin necesidad de detener la medida. Los límites (impuestos por el interrogador) son de 10.000 puntos y de 1.500 a 1.600 nm, lo que nos da una resolución de 0.01 nm.

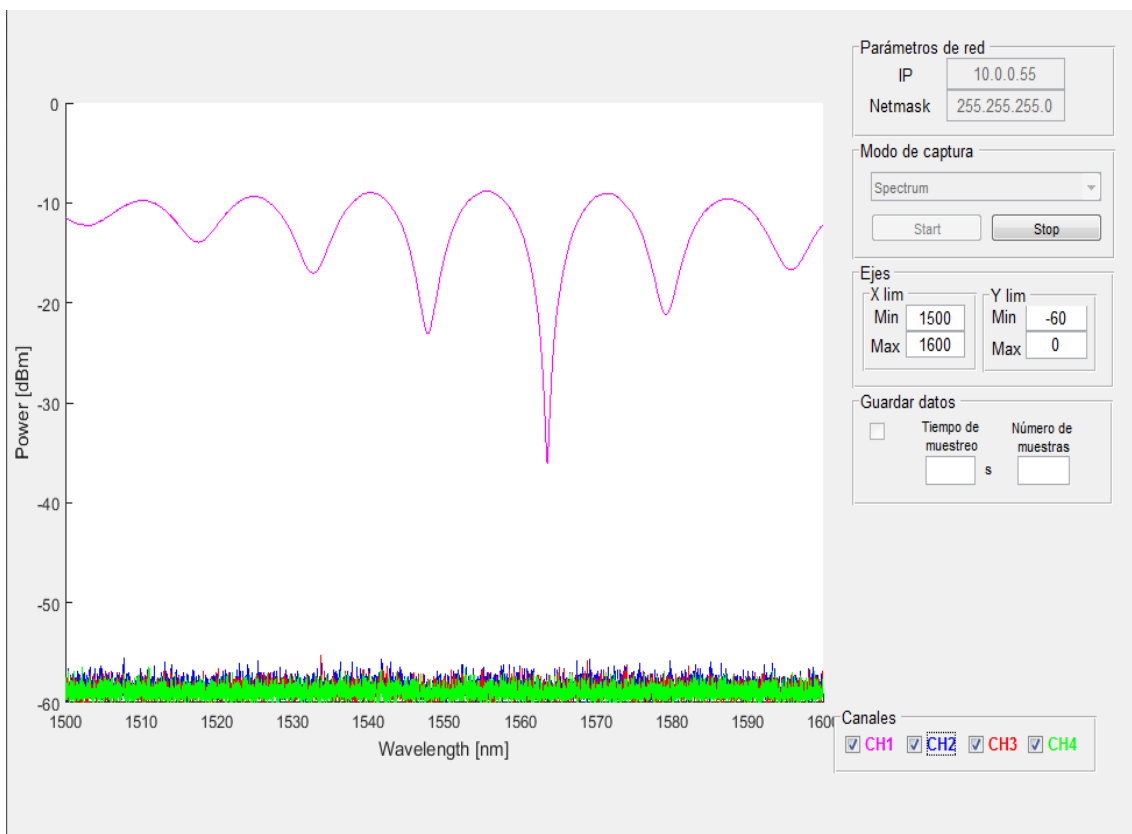


Figura 2.4. Modo “Spectrum”

## FFT

El modo “FFT” nos permite aplicar la transformada de Fourier al espectro medido por el interrogador y representarlo también en tiempo real (en módulo y fase) ya que la velocidad de procesamiento de Matlab, junto con el conjunto de técnicas que componen la FFT para aplicar la transformada son lo suficientemente rápidas para ser invisibles al ojo humano. Además, esto nos facilita el análisis de sensores multiplexados, ya que cada sensor tendrá asociado un punto significativo del módulo de la transformada y monitorizando la fase conseguiremos analizar cada sensor por separado. El menú principal apenas cambia, salvo que ahora nos aparecen dos gráficas, correspondientes a la magnitud y a la fase de la transformada del espectro original.

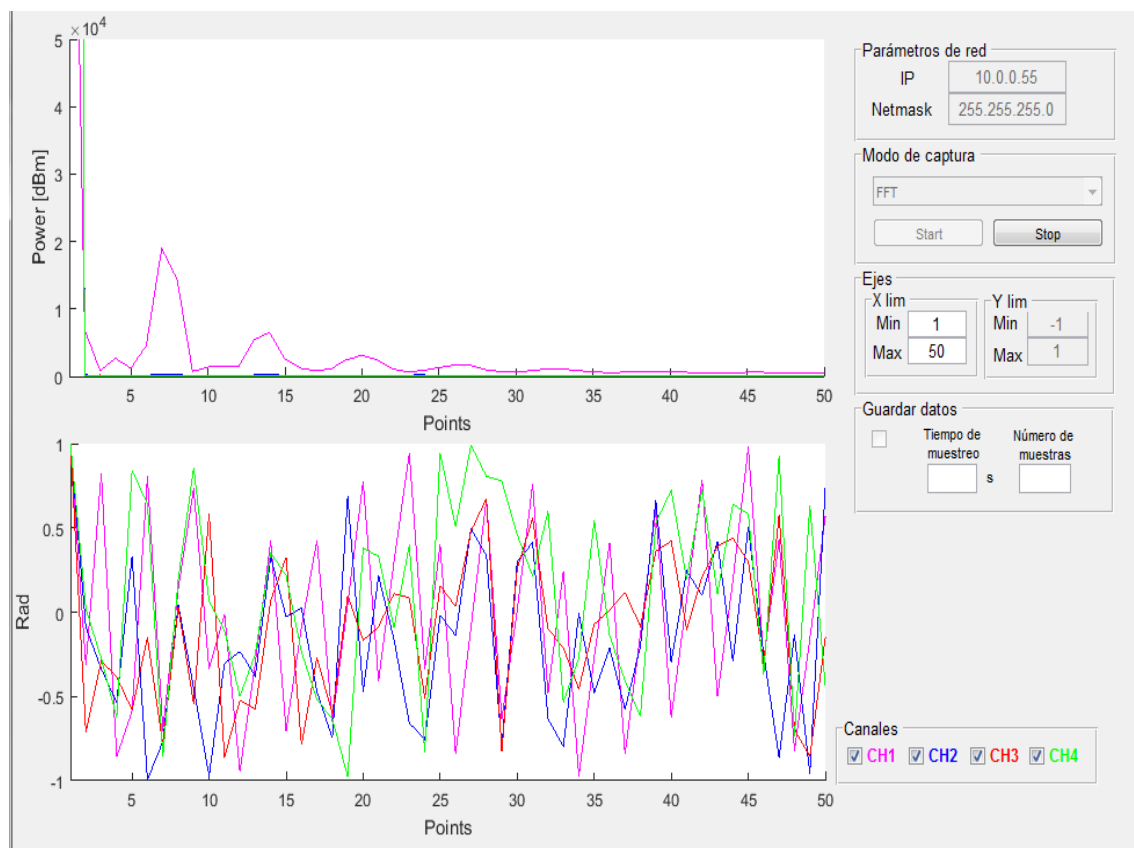


Figura 2.5. Modo “FFT”

## Point Scan

Este modo, que deriva del modo “FFT” y surgido gracias a la capacidad de multiplexar distintos sensores y emplear la técnica de la transformada para discernir cada uno de ellos, nos permite seleccionar un canal de los cuatro que posee el interrogador y monitorizar la fase (que es lo que nos proporciona la información del funcionamiento del sensor interferométrico) de hasta 4 puntos del espectro espacial. Por ello, la interfaz cambia ligeramente, desapareciendo el submenú de selección de canales y siendo sustituido por dos nuevos submenús: uno para la selección de un único canal y otro para indicar el o los puntos que se desean monitorizar. Los colores de las casillas donde se indican los puntos a monitorizar sirven para que sea más fácil su identificación.

Al igual que en el modo anterior, tenemos la representación del módulo y la fase de los puntos salvo que, en este caso, el eje x indica el número de medidas tomadas de cada punto, mostrando un máximo de 400 que, al ser superado será sustituido por nuevos puntos, lo que nos dará una representación de la evolución temporal de la fase de cada punto.

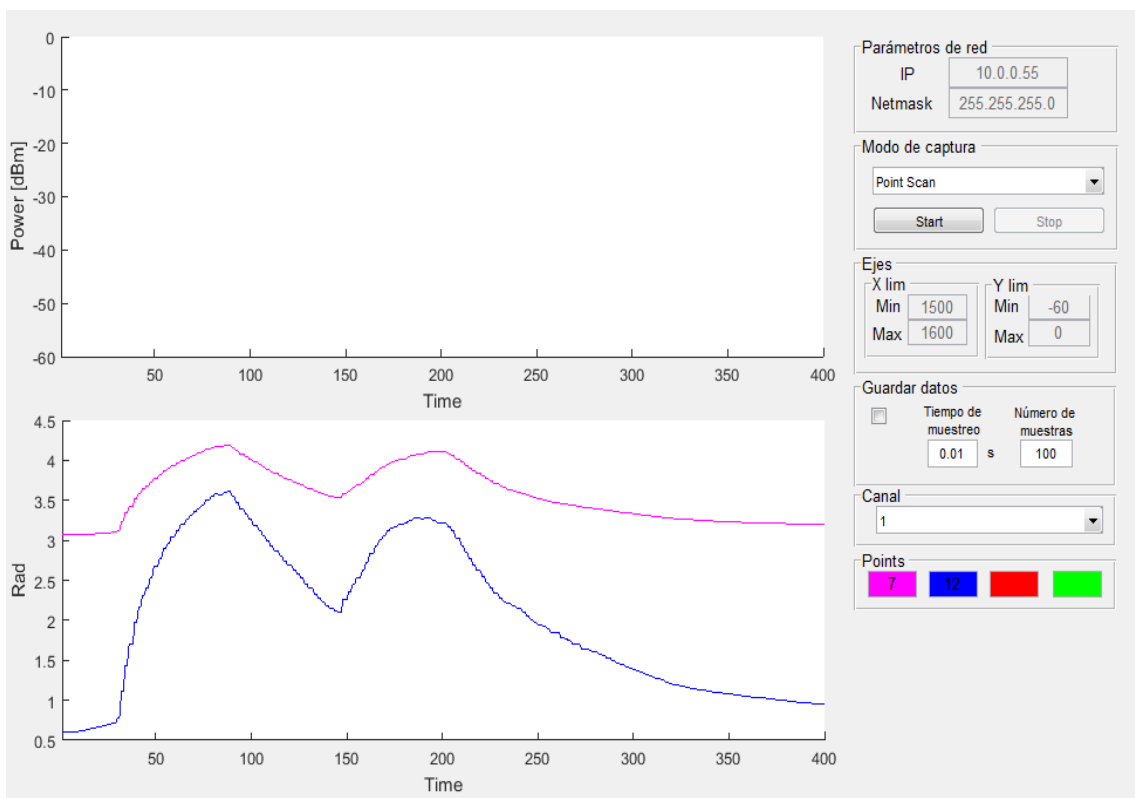


Figura 2.6. Modo “Point Scan”

Con estos tres modos de funcionamiento se cubren las principales formas de analizar sensores. Es importante indicar que, para que las medidas se realicen lo más rápido posible es necesario emplear el primer modo de funcionamiento, el modo “Spectrum”, ya que no involucra ningún tipo de procesamiento posterior.

De cualquier modo, la diferencia de velocidad no es demasiado crítica para las aplicaciones que no requieran tasas de obtención de datos de más de 200 Hz, ya que un ordenador con un procesador estándar es capaz de realizar esos procesos a una velocidad superior a la obtención de datos del interrogador, por lo que es esto último lo que limitará la velocidad. Se está estudiando la forma de obtener datos a la máxima velocidad que permite el interrogador (1000 Hz), deshabilitando completamente la interfaz gráfica o empleando otros lenguajes de programación como Python.

Además del modo de funcionamiento, están los botones de “Start” y “Stop”, para iniciar o detener las medidas. Si el recuadro del submenú “Guardar datos” está marcado, al pulsar “Start” se guardarán los datos en la forma seleccionada en función del modo escogido (más adelante se hablará de esta función). Al pulsar “Stop”, cuando se ha pulsado previamente el botón “Start”, se detendrá la obtención de datos. Si está activado el modo de guardar datos, se guardarán los datos recibidos hasta ese momento.

Cabe destacar que, debido al código del programa y cómo está estructurada la forma de tomar datos y procesarlos, para cambiar de modo es necesario detener la obtención de datos y después cambiar de modo. Esto se hace para evitar guardar datos de distinto tipo, así como para evitar las diferencias al guardar datos en modo “Spectrum” o en modo “FFT”, (el modo “FFT” genera dos archivos diferentes por canal: el correspondiente al módulo y el correspondiente a la fase). Se está barajando la posibilidad de modificar el código para permitir este tipo de cambios.

#### 2.2.2.3.-Ejes

El submenú “Ejes” es el encargado de modificar los límites, tanto del eje x como del y del programa. Por defecto, en los diferentes modos se establecen ciertos límites, para mejorar la visualización y que sean coherentes con los datos que se están representando. Para el modo “Spectrum”, ambos ejes son modificables, teniendo en cuenta que el interrogador únicamente nos proporciona información entre 1500 y 1600 nm. En este caso, el eje x representa longitud de onda y el eje y representa la potencia óptica de salida expresada en dBm. Como se ha mencionado con anterioridad, la representación del espectro de la potencia óptica reflejada no corresponde exactamente con la respuesta de los sistemas analizados. Esto se debe a que el propio interrogador introduce cierta deformación debido a la respuesta no homogénea en longitud de onda del láser sintonizable. Por tanto, será necesario calibrar los datos obtenidos para obtener una medida real de la respuesta reflejada.

Esto no es particularmente importante en el caso en el que se vayan a medir sensores, ya que el aspecto más crítico es la diferencia relativa de longitud de onda entre los valles y los picos del espectro.

A pesar de ello, es conveniente corregir estas pérdidas, lo que se consigue conectando directamente dos puertos del interrogador y obteniendo un espectro de referencia para, posteriormente, corregir los datos en medidas futuras.

En el modo “FFT”, ambas gráficas (módulo y fase) están relacionadas, por lo que los cambios en el eje *x* afectan a ambas gráficas. Sin embargo, los cambios en el eje *y* únicamente afectan a la gráfica donde se representa al módulo, ya que la fase está normalizada entre -1 y 1.

Por último, en el modo “Point Scan” se deshabilita este menú, ya que la representación de la variación de la fase modifica automáticamente el eje *x* para representar únicamente 400 valores. Algo parecido ocurre con el eje *y* de la fase, el cual varía automáticamente con los valores recibidos y procesados por el interrogador. Dado que el módulo en este caso no es relevante, no es necesario modificar los ejes.

#### 2.2.2.4.-Guardar datos

El submenú “Guardar datos” permite modificar los parámetros de guardado de los datos obtenidos. Para que estos cambios se hagan efectivos, el recuadro debe estar activado. De lo contrario, al pulsar el botón “Start” se activará el modo *streaming* y no se guardarán los datos. Si se activa el modo para guardar los datos, se desactivará la representación gráfica de los datos, por lo que no se mostrará nada en la interfaz. Esto se hace para maximizar el rendimiento y evitar que la representación gráfica ralentice al programa a la hora de escribir los datos.

El programa permite escoger la cantidad de medidas que se desean realizar y el intervalo de tiempo entre cada medida, medido en segundos. Para hacer medidas de varios días y evitar obtener un tamaño de archivo inmanejable, será necesario calcular el tiempo que le llevará al programa obtener todas las medidas y traducirlo a los días correspondientes. Es importante destacar que, en ningún caso será posible realizar medidas cuya separación temporal sea menor a 0.001 segundos, ya que esto supera el límite del interrogador (1.000 Hz). Aun así, en función de la cantidad de canales y del modo de funcionamiento, esta velocidad estará limitada. Posteriormente se hablará más detenidamente sobre estas limitaciones y la manera de intentar solventarlas.

Los archivos se guardarán de forma independiente en distintos ficheros del directorio de trabajo (por defecto, donde se encuentra el código del programa). En el modo “Spectrum” y “Point Scan” se guardará un fichero por canal, mientras que en el modo “FFT” se guardarán dos ficheros por canal: un fichero correspondiente al módulo y otro fichero correspondiente a la fase. El nombre, para que sea fácilmente diferenciable estará compuesto por el nombre del canal, el tipo de dato que contiene (en el modo “FFT” se usará el distintivo “Mag” para el módulo y “Pha” para la fase) y por la fecha en la que se comenzó a realizar la medida.

#### 2.2.2.5.-Canales

Este submenú permite seleccionar los canales del interrogador que se están representando en la interfaz o aquellos de los que se desea obtener los datos para guardarlos. En el modo “Streaming”, cada canal aparece representado en la interfaz gráfica con un color distinguible, asociado a la leyenda del propio submenú. En este modo, se puede seleccionar múltiples canales y cambiar entre ellos en todo momento, sin necesidad de parar el *streaming*. Si por el contrario se están guardando datos, se deben seleccionar previamente los canales de los que se desea guardar datos, ya que durante las medidas este submenú aparecerá deshabilitado.

#### 2.2.2.6 – Canal y Points

Estos dos submenús son específicos del modo “Point Scan”. El submenú “Canal” es una lista desplegable que permite escoger uno de los cuatro canales disponibles del Interrogador. El submenú “Points” permite seleccionar hasta 4 puntos del espectro del canal seleccionado (Para emplear correctamente este modo será necesario observar el espectro previamente con el modo “FFT” para ver los puntos de interés), y obtener los datos de la fase de esos puntos y como ésta varía con el tiempo. Al igual que en el resto de modos, si el modo “Guardar datos” está activado, se guardará un archivo por cada punto de la fase obtenida.

#### 2.2.3.-Obtención de datos y funcionamiento del software

En este punto se mostrará el funcionamiento interno del software, destacando el código más importante para el tratamiento de datos, así como los métodos para obtener los datos que provienen del Interrogador y la forma de procesarlos en función del tipo de modo seleccionado. Se mostrarán distintos diagramas de flujo y se profundizará en las funciones para el guardado de los datos y para el procesado de los mismos.

En la figura 2.6 podemos observar el funcionamiento general del software, haciendo distinciones según el modo de trabajo seleccionado y si la opción de guardar datos está activada.

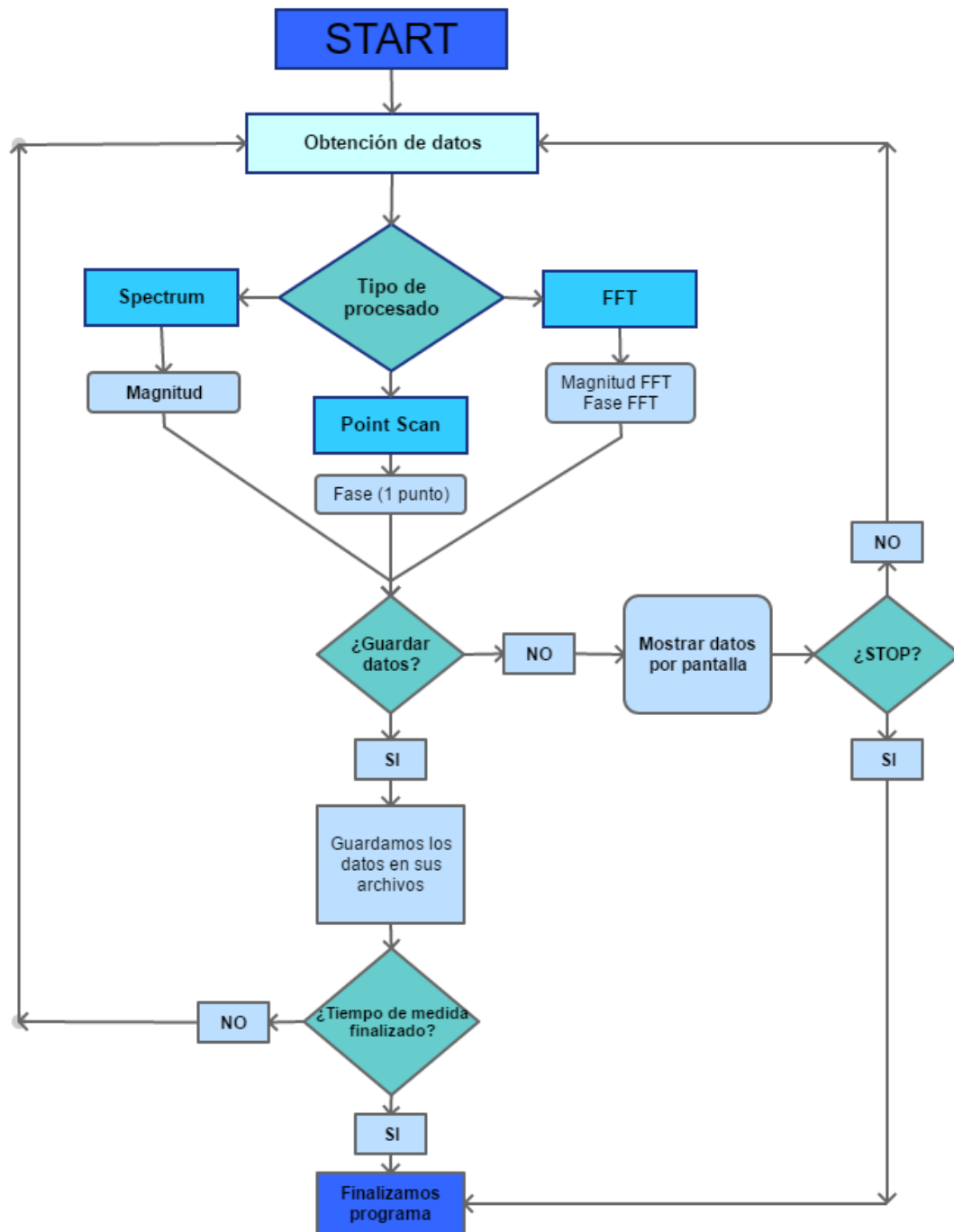


Figura 2.6. Diagrama general de funcionamiento

A continuación, se mostrará más a fondo los modos de funcionamiento del software y su método para la obtención de datos.

Como se ha mencionado en la introducción, la conexión con el Interrogador se hace de forma automática al iniciar el programa, lo que agilizará el funcionamiento de los demás modos. El propio programa implementa una opción para comprobar el estado de esa conexión y volver a conectarse en caso de que la conexión haya fallado.

```
if strcmp(get(handles.InstrCommand, 'status'),'closed')
    fopen(handles.InstrCommand);
end
if strcmp(get(handles.InstrStreamer, 'status'),'closed')
    fopen(handles.InstrStreamer);
end
```

Figura 2.7. Código para comprobar y realizar la conexión de nuevo

### 2.2.3.1.-Funcionamiento del modo “Spectrum”

El modo “Spectrum” es el modo de funcionamiento más sencillo, ya que no requiere un procesamiento posterior de los datos. Este modo recibe los datos del espectro del sensor conectado al Interrogador y los muestra por pantalla o los guarda en un archivo con el nombre del canal, el modo de funcionamiento y la fecha en la que se inició la medida.

En la Figura 2.8 se muestra el diagrama de funcionamiento más detallado de este modo. Al pulsar “START”, lo primero que se realiza es la comprobación de la conexión, para más adelante configurar el Interrogador. Esta configuración consiste en definir la frecuencia de muestreo (configurable para 100 o 1000 Hz), una calibración automática y el modo del propio Interrogador. Para la toma de medidas más rápidas se configura en modo “Streaming”, de este modo el Interrogador enviará ininterrumpidamente los espectros que vaya obteniendo, lo que mejora la velocidad del programa. De otra forma, será necesario hacer la petición al Interrogador y que éste devuelva el espectro.

Tras esta configuración inicial, el programa comprueba si la opción de guardar los datos está activada. De ser así, el programa obtendrá la fecha y hora actual y lo guardará en una variable global para que sea utilizada por el *timer* posteriormente. Este *timer* será el encargado de recibir y guardar en los archivos que sean necesarios los datos obtenidos por el interrogador. La duración del *timer* coincide con el tiempo que transcurre entre medidas y el número de medidas que se ha indicado.

Si la opción de guardar datos no está activada, no se generará ningún *timer* y el programa recibirá los datos del interrogador y los representará por pantalla a la máxima velocidad, limitada por el hardware del equipo y por el propio software de Matlab. Cabe indicar que, a pesar de esto, la velocidad es suficiente como para ver las medidas representadas en tiempo real.



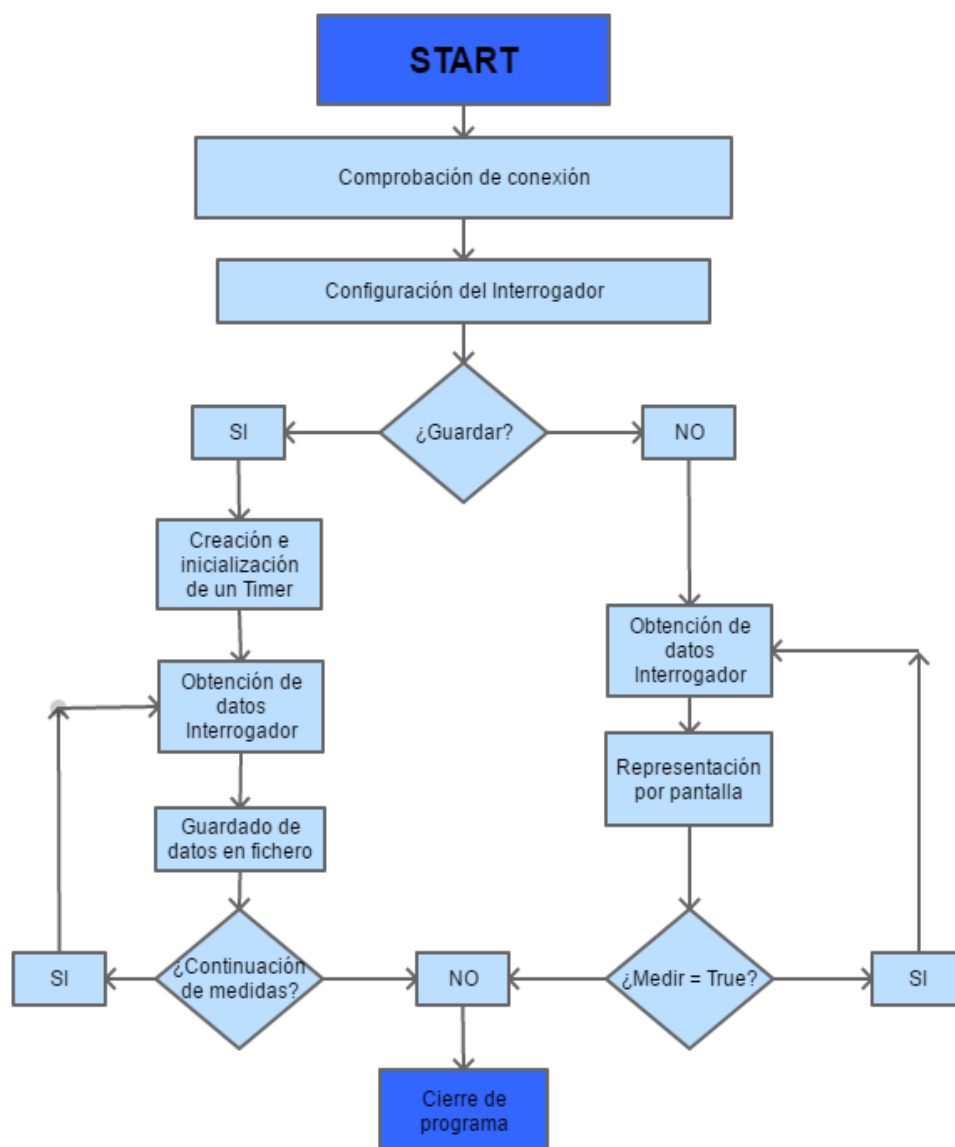


Figura 2.8. Diagrama de funcionamiento del modo "Spectrum"

Tras el cierre del programa los archivos, en caso de que los haya, estarán guardados en la carpeta de trabajo, identificables por el nombre y fecha de realización de las medidas. Estos archivos consisten en 10.000 puntos del espectro por cada medida, por lo que si se realizan medidas a gran velocidad generará archivos muy grandes y serán más complicados de procesar.

### 2.2.3.2.-Funcionamiento del modo "FFT"

El modo "FFT" tiene un funcionamiento muy similar al modo "Spectrum", salvo que éste sí que requiere cierto procesado. Concretamente, se realizará una FFT o transformada rápida de Fourier al espectro obtenido, lo que nos devolverá la magnitud y la fase de dicha transformada. Esto será particularmente útil para la multiplexación de distintos sensores.

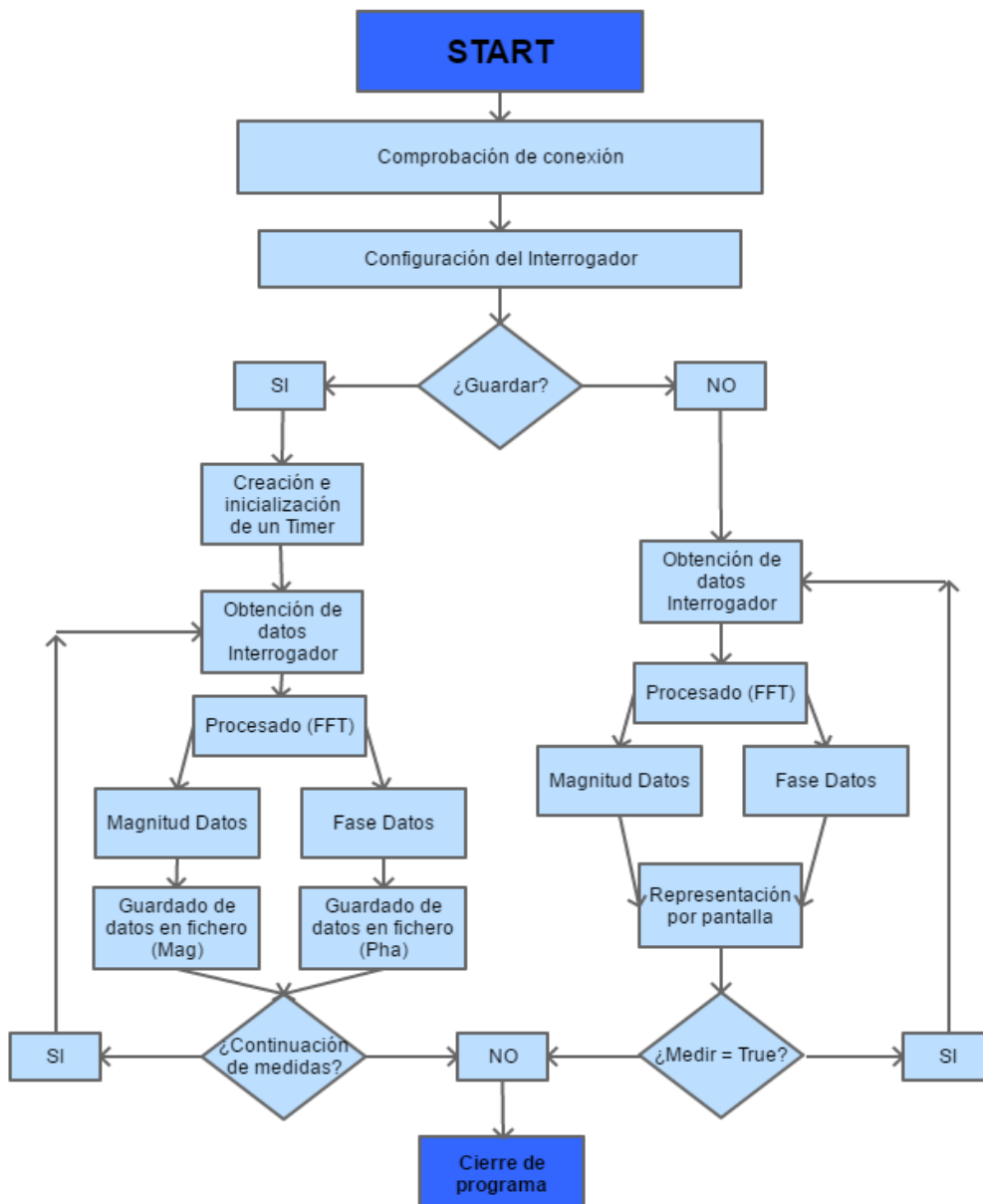


Figura 2.9. Diagrama de funcionamiento del modo "FFT"

Como se puede observar en la Figura 2.9, el funcionamiento de este modo es prácticamente idéntico al modo anterior. La única diferencia recae en la aplicación de una transformada rápida de Fourier y la generación de dos bloques de datos, correspondientes a la magnitud y a la fase de la transformada. Estos datos se representarán en dos gráficas distintas, como se ha indicado previamente o, en el caso de que se escoja la opción de guardar los datos, se guardarán en dos archivos diferentes, identificables por la etiqueta “Mag” y “Pha”, para la magnitud y fase respectivamente. Dado que la FFT es simétrica, la mitad de la información se puede descartar, cosa que se hace mediante software, como se muestra en la Figura 2.10, lo que nos dará 5.000 datos relevantes para la magnitud y para la fase.

```
cla(handles.MagFFT);
cla(handles.PhaFFT);
[xmag,xpha] = fft_datos(spectrum);
xmag=xmag(5001:end,:);
xpha=xpha(5001:end,:)/pi;
if ch1
    plot(handles.MagFFT,xmag(:,ChannelList==1),'m');
    plot(handles.PhaFFT,xpha(:,ChannelList==1),'m');
end
if ch2
    plot(handles.MagFFT,xmag(:,ChannelList==2),'b');
    plot(handles.PhaFFT,xpha(:,ChannelList==2),'b');
end
if ch3
    plot(handles.MagFFT,xmag(:,ChannelList==3),'r');
    plot(handles.PhaFFT,xpha(:,ChannelList==3),'r');
end
if ch4
    plot(handles.MagFFT,xmag(:,ChannelList==4),'g');
    plot(handles.PhaFFT,xpha(:,ChannelList==4),'g');
end
```

Figura 2.10. Eliminación de la parte simétrica de la FFT para su posterior representación

El hecho de requerir un procesamiento posterior de los datos hará que la velocidad del programa disminuya ligeramente, aunque no será limitante. Pese a ello, si se requiere guardar la información de la forma más rápida posible, se deberá usar el modo “Spectrum”.

### 2.2.3.2.-Funcionamiento del modo "Point Scan"

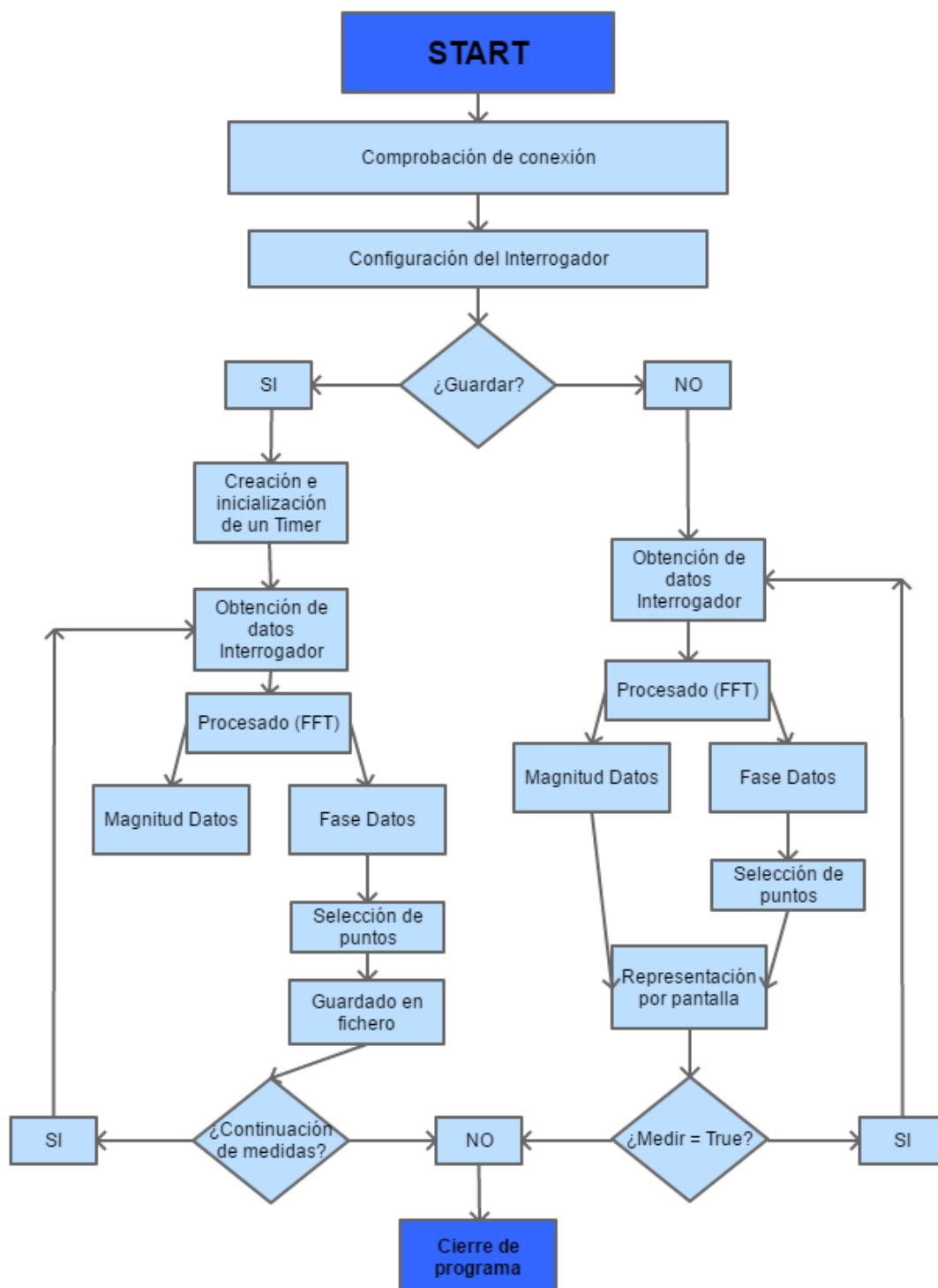


Figura 2.11. Diagrama de funcionamiento del modo "Point Scan"

Este último modo de funcionamiento se basa en el modo “FFT”. Con este modo se podrán escoger hasta 4 puntos de la información dada por la FFT y hacer un seguimiento de la fase de los mismos. Esto se hace principalmente por dos razones: por lo general, para la medida de sensores no es necesaria toda la información proporcionada por la FFT, ya que la información más relevante está en la fase y no en toda, sino en puntos específicos correspondientes a las frecuencias características de cada sensor. Esto hace que, para determinadas aplicaciones, sea interesante el escoger esos puntos característicos y ver la información recogida en la fase, lo que se traducirá en una cantidad de datos a guardar y manipular muy inferior a la obtenida con los modos anteriores.

Además, esta opción nos muestra una evolución temporal mucho más clara y si se representan las medidas en tiempo real sirve para ver el funcionamiento del sensor a medir de una manera más intuitiva.

En este caso, dado que la información de la magnitud no es relevante, a la hora de guardar los datos, esta información se descarta, lo que hace que se optimice el uso de memoria. En el caso de la representación, la magnitud sí que es representada. Pese a ello, como ya se ha dicho, la información relevante se encuentra en la fase.

Los datos de la fase se guardarán en un mismo archivo y contendrá los datos de aquellos puntos seleccionados.

### **2.3.-Medidas experimentales con sensores**

Para comprobar el funcionamiento del software se ha procedido a analizar el funcionamiento de dos tipos distintos de sensores, con estructuras y aplicaciones completamente distintas.

El primero de ellos se trata de un sensor de humedad, el cual lo usaremos para medir la respiración de una persona, mientras que el segundo se trata de un interferómetro Sagnac, empleado como sensor de vibración.

El estudio del primer sensor nos mostrará la capacidad del programa para tomar datos a una velocidad suficiente para seguir la respiración humana, mientras que con el segundo sensor pondremos al límite la capacidad del software de recibir y procesar datos a alta velocidad, mostrándonos también sus limitaciones, siendo necesario realizar unas pequeñas modificaciones al programa principal para ajustar, en cierta manera, las medidas obtenidas para que sean lo más precisas posibles.

Los dos puntos se dividirán en una pequeña introducción teórica en la que se explicará los fundamentos del funcionamiento de ambos sensores, las ecuaciones matemáticas que describen su modo de medir los distintos parámetros y la construcción del propio sensor.

Tras la introducción, se propondrán distintos experimentos para comprobar su funcionamiento y, en el caso del sensor de vibración, se profundizará más y se propondrán más experimentos para mostrar las limitaciones del programa.

Por último, para concluir con este punto, se resumirá todo lo visto anteriormente, se comentarán los resultados obtenidos y se propondrán soluciones a las limitaciones del software para trabajar en ellas en un futuro.

### 2.3.1-Medida de un sensor de humedad

En este breve apartado se describirá el funcionamiento de un sensor de humedad, empleado como sensor para medir la respiración de una persona. Tras describir la composición y estructura del sensor se mostrará una medida realizada por el interrogador con el software descrito y se comentarán los resultados obtenidos.

El sensor se basa en un interferómetro Fabry-Pérot de alta sensibilidad, fabricado mediante el empalme de fibra monomodo (Corning SMF-28) a una pequeña sección de 700  $\mu m$  de fibra microestructurada o de núcleo suspendido “four-bridge MOF”, cuyo final ha sido seccionado perpendicularmente [9].

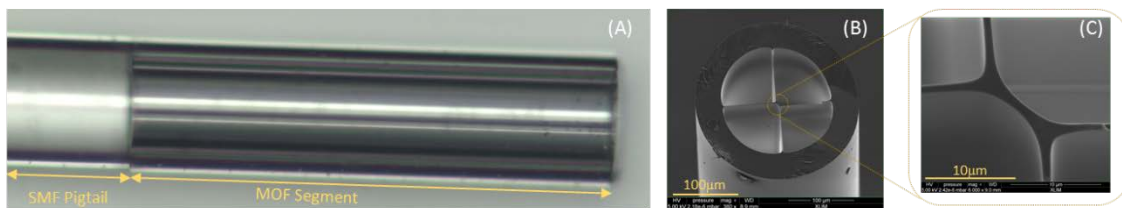


Figura 2.12. (a) Imagen de la cavidad a vista de microscopio, (b) y (c) Imágenes de SEM de la fibra four-bridge MOF

La señal óptica reflejada está descrita por la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2 \cdot n \cdot d}$$

Donde  $\Delta\lambda$  es la separación en longitud de onda del espectro óptico,  $\lambda$  es la longitud de onda de trabajo,  $n$  es el índice de refracción efectivo de la fibra y  $d$  es la longitud total de la cavidad MOF.

En este caso,  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,  $d = 700 \mu m$  y  $n_{eff} = 1.37$

El espectro obtenido con el interrogador se muestra en la Figura 2.13.

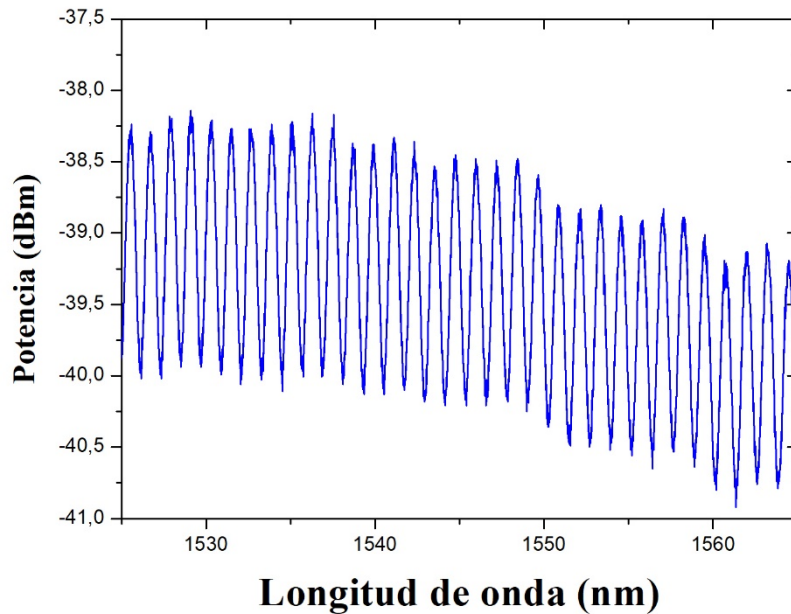


Figura 2.13. Espectro de la cavidad Fabry-Pérot

Para medir la humedad de forma más precisa, se realiza una deposición de óxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ). Se deposita sobre el núcleo del sensor de forma uniforme, formando una capa de un grosor en torno a  $1 \mu\text{m}$ , con óxido de estaño de 99,99% de pureza.

Esta capa de óxido es altamente sensible a, en el caso que nos atañe, a las variaciones de humedad [10]. Por tanto, el índice de refracción del segundo segmento del interferómetro variará dependiendo de la humedad relativa del ambiente y, por tanto, también lo hará la señal reflejada.

En la siguiente figura se muestra el funcionamiento del sensor antes y después de depositar la capa de óxido de estaño. Estas graficas se han obtenido a partir de la fase de la FFT aplicada a dos medidas en una cámara climática con humedad variable

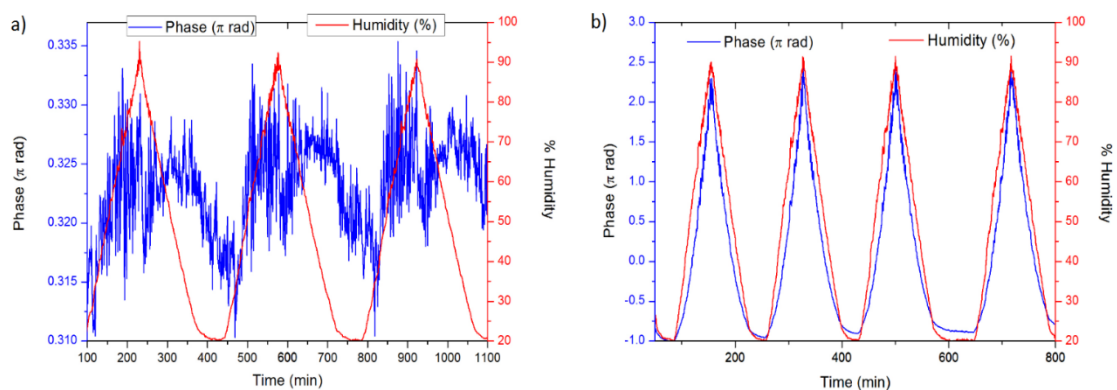


Figura 2.14. (a) Sensor antes de depositar (sensor en azul, cámara climática en rojo) y (b) después de depositar



La mejora del sensor tras depositar esta capa de óxido de estaño se observa claramente en la segunda gráfica, detectando casi a la perfección la humedad presente y sin retardos.

Para concluir este capítulo, se realiza una medida a 10 Hz con el interrogador empleando el sensor para medir la respiración de una persona. De esta manera se muestra la capacidad, tanto del sensor para medir variaciones más rápidas de humedad, como del software para recibir y procesar los datos de las medidas obtenidas.

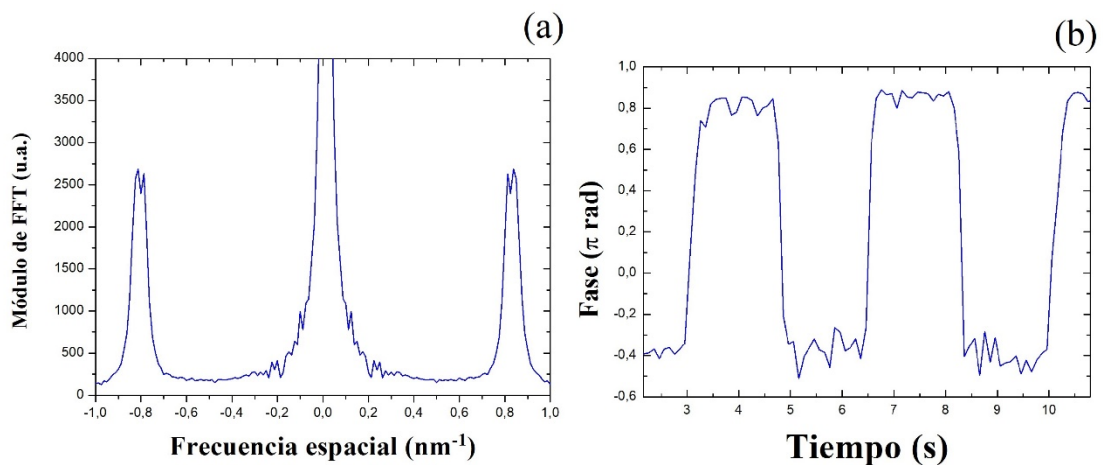


Figura 2.15. (a) Módulo de la FFT del espectro obtenido y (b) medida de respiración durante 10 segundos

De la segunda gráfica se puede observar la gran sensibilidad del receptor frente a la humedad presente en el aliento, cuyas rápidas variaciones mantienen siempre el mismo desplazamiento de fase. Este desfase no puede cuantificarse matemáticamente en función de la humedad aplicada, sin embargo, puede decirse que depende, entre otras cosas, del grosor de la capa de material depositada.

Como conclusión a este breve apartado, podemos validar el software para este tipo de medidas, mostrando una buena resolución.

### 2.3.2-Medida de un sensor de vibración

El sensor a analizar se trata de un interferómetro Sagnac con fibra altamente birrefringente. Este sensor en particular consiste en 3 secciones de fibra mantenedora de la polarización, siendo la fibra intermedia la que actúa como sensor. Los otros dos segmentos de fibra, de idéntica longitud, son requeridos únicamente para que actúen como canal de comunicaciones, por lo que será necesario anular su contribución, ya que esto afectaría a la capacidad del Sagnac de actuar como sensor. Para ello, se fusionan estos segmentos al segmento que actúa como sensor con un ángulo de  $45^\circ$ , para que el ángulo total sea de  $90^\circ$ , anulándose así la contribución de las fibras PM (fibras mantenedoras de la polarización) [11]. El esquema del interferómetro Sagnac se muestra en la Figura 2.16.

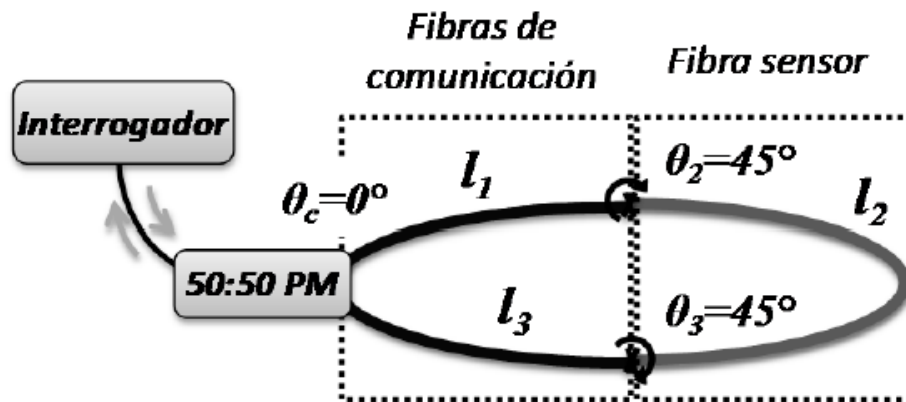


Figura 2.16. Esquema del Interferómetro Sagnac a analizar [11]

Con esto se consigue que el sensor actúe como un FLM (*Fiber Loop Mirror*) de alta birrefringencia que, al obtener los beneficios de un sistema todo fibra, no necesita ningún controlador de polarización para su correcto funcionamiento. Con todo esto, la ecuación empleada para el análisis del sensor es la de un HiBi FLM de tres secciones es [11]:

$$T = [C_1 + C_2 + C_3 + C_4]^2$$

$$\beta_n = \frac{2\pi \cdot l_n \cdot \lambda_0}{L_{Bn} \cdot \lambda} + \Delta\phi_n$$

Dónde:

$$C_1 = \cos\left(\frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}{2}\right) \sin(\theta_c) \cos(\theta_2) \cos(\theta_3)$$

$$C_2 = \cos\left(\frac{-\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}{2}\right) \cos(\theta_c) \sin(\theta_2) \cos(\theta_3)$$

$$C_3 = \cos\left(\frac{\beta_1 + \beta_2 - \beta_3}{2}\right) \cos(\theta_c) \cos(\theta_2) \sin(\theta_3)$$

$$C_4 = -\cos\left(\frac{\beta_1 - \beta_2 + \beta_3}{2}\right) \sin(\theta_c) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)$$

Siendo  $\theta_c = 0^\circ$ , condición impuesta por el acoplador óptico PM. También, como ya se ha mencionado, dado que las longitudes de las fibras que actúan como canal de comunicaciones son de la misma longitud,  $l_1 = l_3$ , de lo que se deduce que

$$\pm\beta_1 \mp \beta_3 = 0$$

Y para maximizar la interferencia, el ángulo entre fibras se fija a

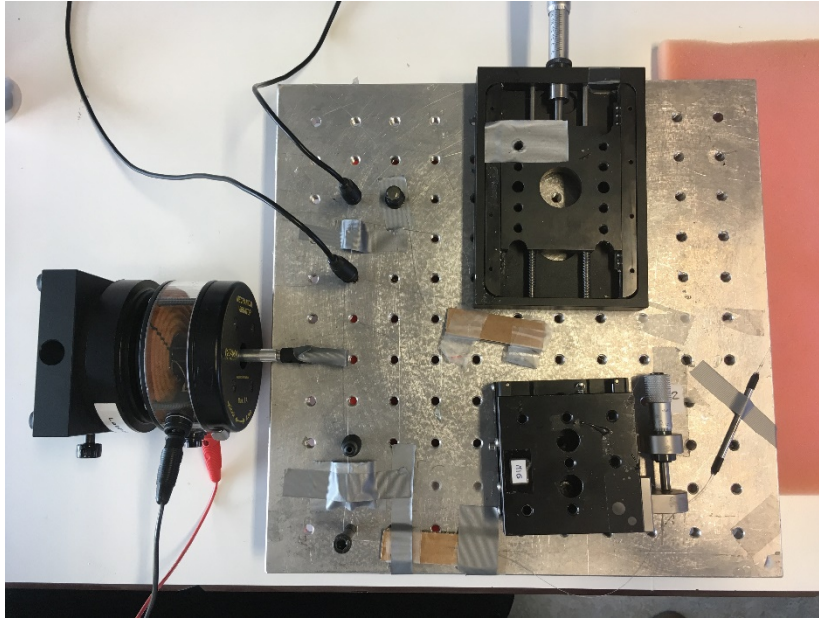
$$\theta_2 = \theta_3 = 45^\circ$$

Dando como resultado la función de transferencia  $T$ , similar a la de un HiBi FLM de una sección convencional donde  $\sin \theta = 2 \sin^2 45^\circ$ :

$$T = 1 - R = [2 \sin^2 45^\circ \cos(\beta_2/2)]^2$$

Tras esta introducción teórica del funcionamiento del sensor, nos disponemos a analizar su comportamiento frente a vibraciones de distinta frecuencia. Para ello hemos empleado un generador de funciones, el cual nos permite escoger tanto la frecuencia de la señal como la amplitud, así como la forma de la señal que deseemos. En nuestro caso, para el análisis únicamente se han usado las formas de onda rectangular y sinusoidal, que servirán para comparar la capacidad del software de distinguir entre ambas. También se usará un vibrador mecánico, el cual traducirá la señal generada por el generador de funciones a vibraciones mecánicas que aplicaremos a nuestro sensor.

El esquema experimental completo se muestra en la figura 2.17.



*Figura 2.17. Montaje experimental para la medida de vibraciones con un interferómetro Sagnac*

El modo de operación a seguir será el siguiente: se irá subiendo progresivamente de frecuencia moduladora, comenzando en 1Hz con una frecuencia de muestreo del interrogador más alta para ver cómo se comporta el software y si las medidas son las esperadas. Se comentarán los resultados obtenidos para distintas frecuencias de muestreo y frecuencia moduladora, así como para distintas formas de onda. Como último estudio se realizará un barrido en frecuencia para comprobar la limitación del software y se propondrán distintas líneas futuras de trabajo para tratar de solventar estas limitaciones.

Hay que destacar que todas las medidas se han realizado con tramas de 5 segundos, modificando el número de muestras a obtener para que, acorde con la frecuencia de muestreo, la duración de las medidas sea siempre la misma, exceptuando el último experimento. Éste, para poder observar mejor el barrido, se realizará durante 10 segundos a máxima velocidad, para ver los límites del programa y para no obtener un archivo de tamaño demasiado grande, con la dificultad que conlleva el tratamiento de los datos.

Como ya se ha dicho, el análisis se comienza con una señal cuadrada de 1 Hz, muestreando a una frecuencia de 20 Hz. El resultado que se muestra en la Figura 2.18 se ha obtenido procesando los diferentes espectros obtenidos por el interrogador, observando el desplazamiento de uno de los valles, cuya amplitud depende directamente de la amplitud de la señal moduladora. Éste será el método que se usará durante todo el experimento.

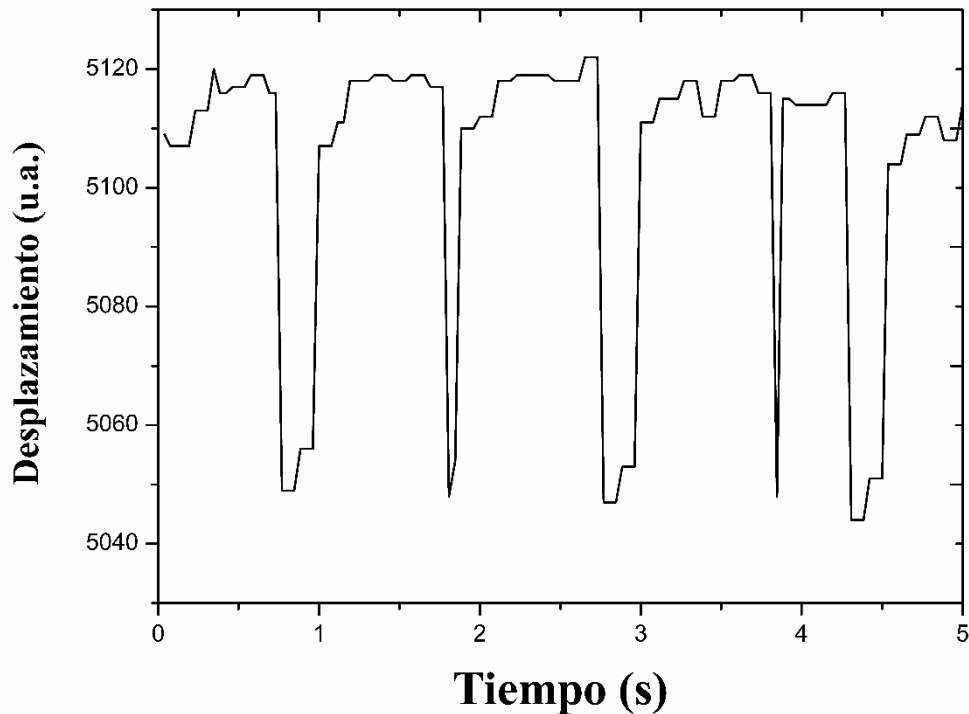


Figura 2.18. Desplazamiento de un valle del espectro del Sagnac aplicando una vibración de 1Hz

Lo primero que podemos apreciar es la forma inusual de los pulsos, siendo estos irregulares, cosa que no debería suceder. Esto nos muestra una de las limitaciones del software. El propio programa Matlab, al tratar de tomar medidas a relativamente gran velocidad, sufre un pequeño retardo aleatorio entre muestras, por lo que estas no están equiespaciadas. Al emplear este software para medidas largas, o no tan rápidas como en el caso anterior del sensor de respiración, estos retardos son despreciables y no afectan a las medidas. Sin embargo, en este caso ese pequeño retardo hace que la forma de la señal se distorsione y, a pesar de que se puede observar la forma aproximada e identificar la frecuencia de vibración aplicada, será necesario tratar de corregirlo. Dado que es un problema inherente a Matlab, una solución mediante la modificación del programa no es evidente, a pesar de que se ha tratado de corregir esa desviación temporal de las muestras, para que las medidas sean más fieles a la realidad. Para ello implementaremos una sencilla función que cada vez que se tome una medida guarde también el instante de tiempo exacto, de modo que, tras concluir la toma de medidas, podremos representar las medidas corrigiendo esta pequeña desviación temporal.

En la Figura 2.19 se muestra el sencillo código que se implementa para este cometido. La función `clock` de Matlab nos da una precisión de milésimas de segundo; suficiente para realizar las medidas.

```
Timestamp=clock;
Timestamp=Timestamp(6)+Timestamp(5)*60+Timestamp(4)*3600;
timestampdata=fopen(['Timestamp' handles.fecha '.txt'],'a+');
fprintf(timestampdata,'%d ',Timestamp);
fprintf(timestampdata,'\r\n');
fclose('all');
```

Figura 2.19. Función que obtiene y guarda en un fichero el "timestamp" de cada medida

Como es de suponer, esto es únicamente una medida provisional, ya que no obtenemos medidas perfectamente precisas y al aumentar la frecuencia de muestreo este efecto se amplifica por lo que, para medidas a alta frecuencia, será necesario buscar una solución alternativa.

Con esta función ya implementada, procedemos a repetir la primera medida, cuyos resultados se muestran en la Figura 2.20, junto con otra medida de una señal sinusoidal de idéntica frecuencia.

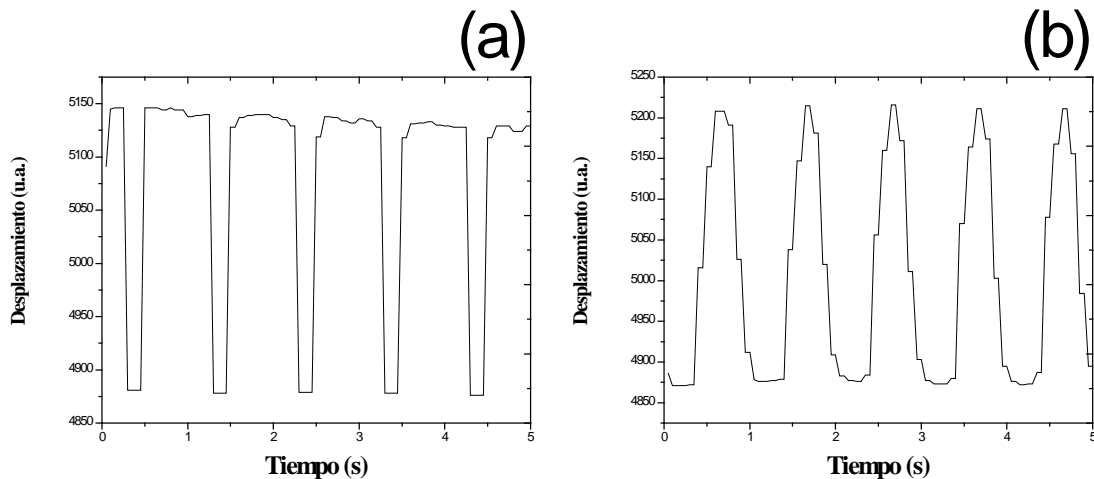


Figura 2.20. (a) Desplazamiento de un valle del Sagnac para una vibración de 1Hz cuadrada y (b) sinusoidal

Lo primero que se puede apreciar es la considerable mejora frente al primer caso, donde ahora sí que se puede distinguir la forma de la señal. En cuanto a la señal sinusoidal, también se distingue la forma de la señal moduladora, pese a que siguen apareciendo ciertos escalones. Esto es fácilmente solucionable aumentando la frecuencia de muestreo para que, al tomarse más muestras, la forma de la onda se corresponda con la de una señal sinusoidal.

Las próximas medidas serán similares a las ya realizadas, pero aumentando la frecuencia de la vibración, hasta 5 Hz y comparando resultados. Los resultados de los siguientes experimentos se muestran en la Figura 2.17. Hay que mencionar que, a la hora de emplear una vibración de 5 Hz aumentamos la frecuencia de muestreo al doble, ya que con 20 Hz el programa no era capaz de realizar medidas correctas.

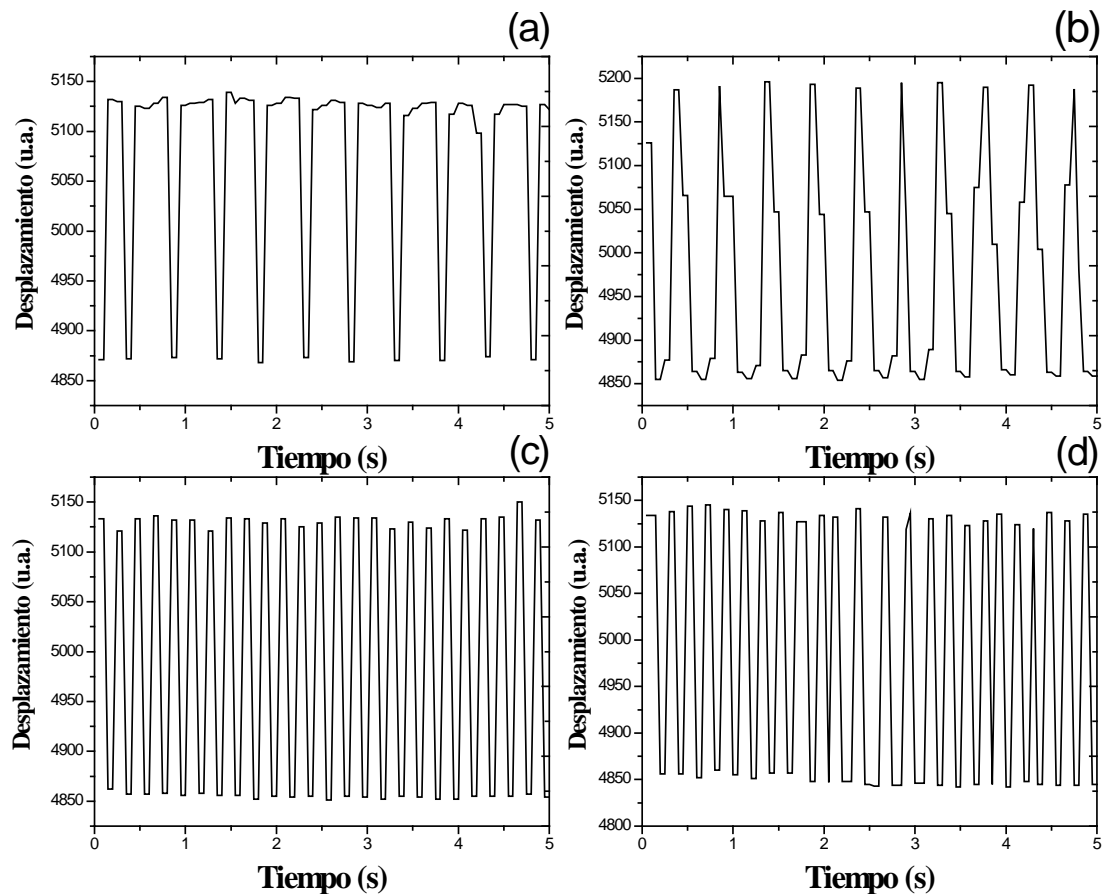


Figura 2.21. (a) Repetición de las medidas con una señal cuadrada de 2Hz, (b) sinusoidal de 2Hz, (c) cuadrada de 5Hz y (d) sinusoidal de 5Hz

Como se puede ver, la señal cuadrada se observa perfectamente, tanto cuando la frecuencia es de 2 Hz como cuando es de 5 Hz. La señal sinusoidal es distinguible a 2 Hz, a pesar de unos pequeños escalones que, incluso con la modificación del software no ha sido posible solventar. En cuanto a las señales de 5 Hz, la señal sinusoidal es prácticamente indistinguible de la señal cuadrada, probablemente debido al montaje experimental.

Para tratar de corregir este defecto e intentar realizar una medida en la que fuese capaz discernir entre la señal cuadrada y la sinusoidal, se intentó aumentar de nuevo la frecuencia de muestreo. Sin embargo, no se pudo obtener una medida precisa, posiblemente debido a falta de tensión aplicada al sensor. Además, hay que mencionar que, al aumentar la frecuencia del generador de funciones, la amplitud del desplazamiento generado disminuye, por lo que el desplazamiento de la fase también, lo que puede acarrear problemas de sensibilidad.

Pese a esto, se observa que el software tiene una importante carencia frente a medidas de este tipo, siendo teóricamente alcanzable la resolución de frecuencias de hasta 500 Hz (siendo ésta la mitad de la frecuencia de muestreo del interrogador).

Por último, se realiza un barrido de frecuencia con el generador de funciones, comenzando en 1 Hz y acabando en 500 Hz, siendo esta, como ya se ha mencionado, la frecuencia máxima discernible. Los resultados se muestran en la Figura 2.22.

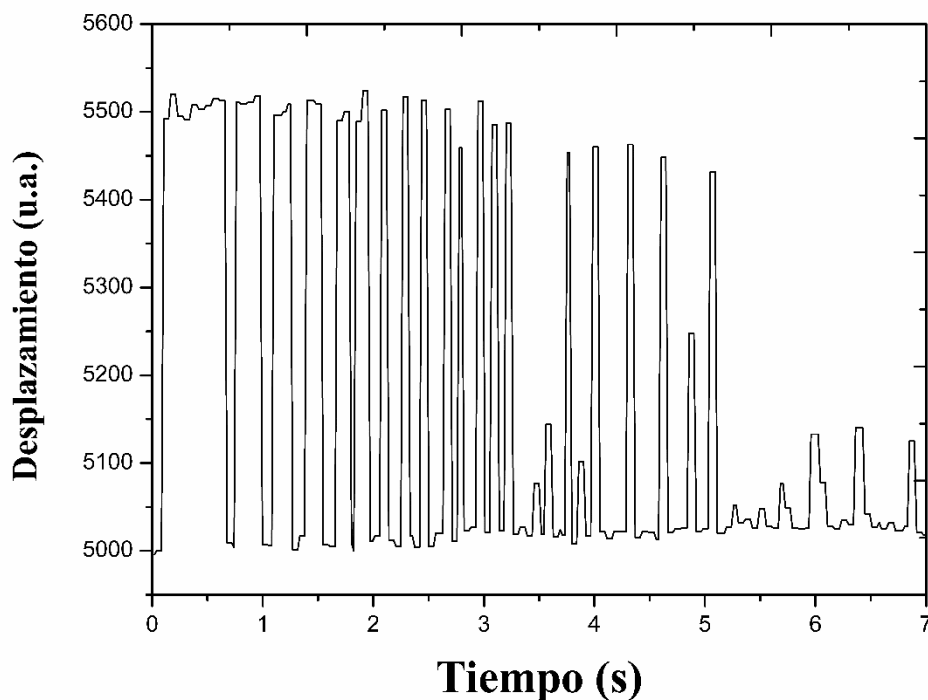


Figura 2.22. Sección de los resultados de un barrido en frecuencia de 1 Hz a 500 Hz



De la Figura 2.22 podemos comentar otra de las limitaciones del programa: al tratar de muestrear a máxima velocidad, ya sea por motivos de hardware como de software, las medidas no comienzan ni terminan en el instante que deberían, ya que supone mucho esfuerzo computacional y sufre un leve retardo al inicio. Sin embargo, el defecto más significativo es el tiempo de desplazamiento entre muestras que sufre durante las medidas, ya que se va acumulando y hace que la medida no finalice cuando debería, distorsionando gravemente el experimento. Además, debido a limitaciones tanto de hardware como de software, el programa no es capaz de muestrear a 1000 Hz, ya que los procesos intermedios entre medidas (guardar y/o modificar datos) conllevan un tiempo de proceso en el cual no se toma ninguna medida, limitando la velocidad.

Una conclusión directa que se extrae de este apartado es la urgente necesidad de corregir estas limitaciones, las cuales han ido surgiendo conforme el proyecto iba avanzando y no ha sido posible solucionarlas, tanto por falta de tiempo como por el desconocimiento de las causas que las producen. La solución planteada inicialmente no ha alcanzado el rendimiento esperado y, pese a la solución intermedia propuesta, no se ha conseguido optimizar más el software.

## **2.4.-Conclusiones**

Como conclusión y pequeño resumen de este capítulo, se ha presentado y validado un software para el interrogador comercial SI155 con sus limitaciones debidas tanto a hardware como a software. Es por eso que se plantea, como posible estudio posterior, el emplear un lenguaje de programación más sencillo y ligero como es Phyton para comprobar si se puede mejorar la tasa máxima de muestreo provista por el fabricante. Además, se debe realizar un análisis detallado de las causas de los retardos en la computación de las medidas producido por Matlab, para intentar adecuar el software y evitarlos a ser posible.

Pese a las limitaciones, como ya se ha mencionado, el software puede usarse para muestrear en tiempo real e incluso a velocidades relativamente altas la fase de la FFT con la respuesta de sensores interferométricos. Además, la interfaz gráfica es muy intuitiva y sencilla de usar. En líneas futuras se podría traducir el software a otro lenguaje de programación para comprobar si estas limitaciones vienen verdaderamente impuestas por el lenguaje o por el hardware; o en caso contrario adaptar el programa para conseguir el máximo rendimiento.

## CAPÍTULO 3 – ESTUDIO DE LÁSER PULSADO TODO FIBRA

### 3.1.-Introducción

El propósito de este experimento es el de obtener un láser pulsado, de pulsos ultracortos empleando una cavidad lineal, con un *Saturable Absorber Mirror* (SAM según sus siglas en inglés) en su extremo y sin emplear fibra mantenedora de la polarización, siendo necesario, en su defecto, un controlador de la polarización dentro de la cavidad [12-14].

Para ello, se seguirán una serie de pasos previos al montaje final, como analizar y caracterizar distintos tipos de fibras dopadas con erbio para ver cuál se ajusta mejor a nuestras necesidades en cuanto a la ganancia que proporciona, rango de potencias de trabajo y longitud de la fibra, ya que esto va a influir en la tasa de repetición de pulsos.

Empleando un software programado en Matlab capaz de controlar simultáneamente al driver CLD1015 de *Thorlabs* y al Analizador de Espectros Ópticos (OSA según sus siglas en inglés) ADVQ8384 de *Advantest*, haremos distintos barridos de potencias de bombeo y observaremos el ASE de las distintas fibras. Tras esto, ensamblaremos la cavidad y realizaremos distintos tipos de test para averiguar el rango de funcionamiento del láser, espectro óptico y eléctrico del mismo y anchura temporal de los pulsos. Una vez caracterizado completamente el diseño, trataremos de conseguir que el láser sea sintonizable [16] y ver cómo esto afecta al funcionamiento del mismo.

### 3.2.-Caracterización de las fibras

En el laboratorio se dispone de distintos tipos de fibra dopada, con diferentes longitudes: M-12 de 3 metros, I-25 de 2.5 y 4 metros, Er-30 de 5 y 7 metros y Er-110 de 30, 55 y 60 centímetros. Todas ellas son fibras dopadas con erbio o, como lo llamaremos a partir de ahora, EDF según sus siglas en inglés, y difieren en la concentración de dopante, lo que se traduce en distintos niveles de absorción o ganancia.

Con una serie de 8 escalones en el rango de 0,15 y 0,4125 mA de alimentación para el bombeo centrado en 980 nm haremos barridos consecutivos, observando la zona en la que el ASE está presente, sin llegar a producirse la saturación, ya que, como se ha explicado en el apartado del enganche de fase, éste no es un fenómeno deseado.

Tras realizar las pruebas con las distintas fibras, optamos por emplear la fibra Er-30, debido a su ganancia plana en la zona de interés (en torno a 1555.8 nm) [15,17] para bajas potencias de bombeo. Tras seleccionar la fibra, procedimos al montaje del diseño.

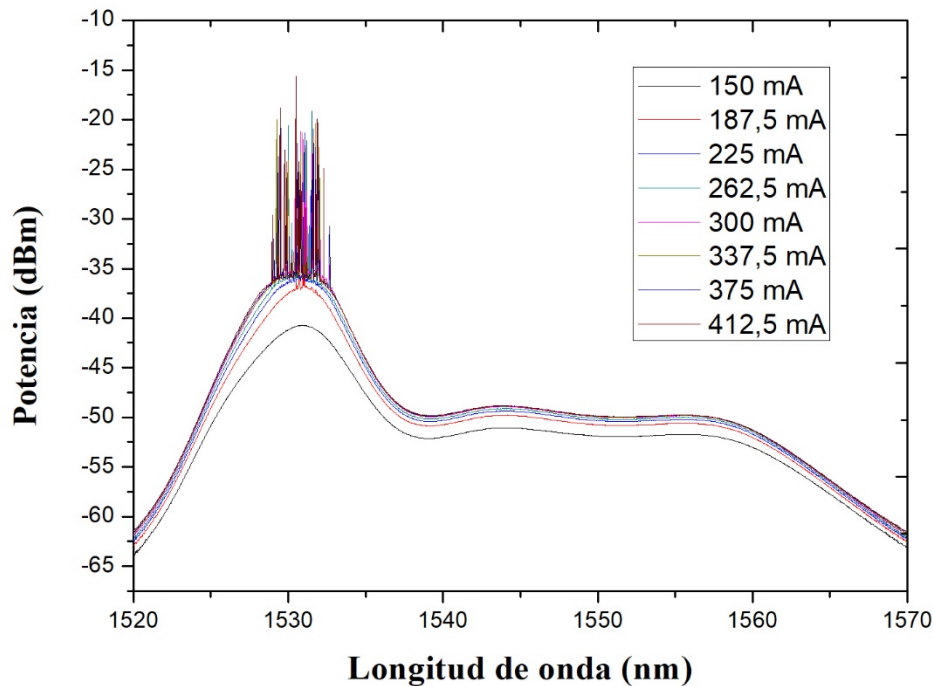


Figura 3.1. ASE de la fibra Er-30 para distintas intensidades de bombeo

### 3.3.-Componentes a emplear y montaje del diseño

El planteamiento para comprobar el correcto funcionamiento y que no ocurra ningún error debido a que algún componente es que, además de revisar previamente todos los conectores, es ir comprobando con el analizador de espectros óptico que a la salida tenemos algo coherente con los resultados teóricos [18-22].

Es importante destacar que se ha optado por fusionar todos los componentes posibles del diseño para reducir pérdidas, ya que esto es muy crítico para conseguir el enganche de fase deseado [23-25].

Los componentes a usar (las respectivas hojas de características se adjuntan en el Anexo 1), tanto para el diseño como para los diferentes análisis y posteriores aplicaciones son:

### Material

- Fibber Bragg Grating de 1558 nm
- Láser de bombeo a 980 nm modelo PL980P330J
- Fibra dopada Er-30
- Fibra SMF-28
- Fibra PM-1550HP
- WDM
- Aislador
- Acoplador 90-10
- Acoplador 50-50
- Saturable Absorber Mirror (SAM) PM1550HP
- Controlador de polarización
- Pasta térmica

### Equipo

- Analizador de espectros ópticos (OSA) ADV8384Q
- Osciloscopio Agilent HP 86100C
- Analizador de espectros eléctricos (ESA) R&S FSP 9kHz – 30 GHz
- Fusionadora Fujikura ARCMaster FSM-100P
- Peladora Fujikura CT-32
- Microposicionadores
- Fotodetector New Focus Model 1611 1 GHz

El esquema completo del láser sería el siguiente:

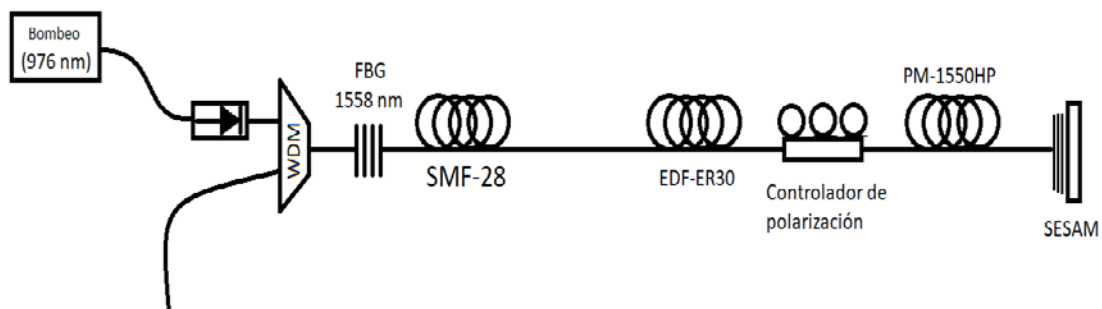


Figura 3.2. Esquema del láser pulsado en cavidad lineal

Como se puede observar en el esquema, el circuito está compuesto por un láser de bombeo que emite en torno a 976 nm, cuya intensidad iremos variando para estudiar el comportamiento del láser a distintas potencias. Además, emplearemos un aislador óptico, el cual será colocado antes del WDM, para evitar que cualquier reflexión que se produzca pueda afectar al bombeo, ya que son muy sensibles a dichas reflexiones. Es importante destacar que, dado que trabajamos a bajas potencias, no debería de ser demasiado problemático.

Tras el WDM, colocamos un FBG de 1558 nm. Esto nos permitirá filtrar la longitud de onda de emisión que deseamos para nuestro laser. Después de montar y comprobar el correcto funcionamiento del diseño, emplearemos microposicionadores para tratar de conseguir un láser pulsado sintonizable. Además, dado que el diseño se basa en una cavidad lineal, el FBG marcará el primero de los dos límites de la cavidad del láser, siendo el segundo el SAM.

A continuación, introduciremos dos segmentos de fibra. El primero de fibra monomodo estándar SMF-28 y después fibra dopada con Erblio EDF-Er30. La función del segundo segmento es la de amplificar la luz que viaja por la cavidad [26-29], mientras que el primer segmento tiene como función principal la de aumentar la longitud de dicha cavidad, de tal modo que los pulsos de luz tardan más tiempo en recorrerla y así se puede ajustar la tasa de repetición del láser.

El siguiente elemento que se debe colocar es el controlador de polarización. Éste es el encargado de modificar la polarización de la luz a su entrada para conseguir el *mode locking* pasivo. Sin este elemento, dado que se emplean secciones de fibra no mantenedoras de la polarización, se alcanzaría un régimen de operación llamado “*Q-switched Mode Locking*” [18-21] el cual es muy similar al *mode locking* (se siguen generando pulsos de luz), sin embargo, se producen inestabilidades que derivan en variaciones de la potencia de los pulsos. Esto se corrige mediante el controlador de polarización, el cual es capaz de modificar la polarización a su salida. Es importante destacar que no sabemos con exactitud el tipo de polarización que se obtiene, por lo que deberemos ir comprobando mediante un osciloscopio si estamos trabajando en el régimen deseado. También cabe decir que ese estado de polarización es muy sensible [30], por lo que un pequeño golpe o movimiento de la fibra haría que se modificase esa polarización y sería necesario volver a ajustar el controlador. Para evitar en la medida de lo posible esto, se fija a una superficie estable todo el montaje.

En el último tramo, se encuentra una sección de fibra mantenedora de la polarización PM-1550 HP, la cual se conecta finalmente al SAM. Se emplea este tipo de fibra para mantener la polarización obtenida con el controlador de polarización. Además, el SAM incluía un segmento de este tipo de fibra, por lo que hará más sencilla la fusión de los segmentos.

Para concluir el montaje, como ya se ha mencionado, se encuentra el SAM, que será el encargado de generar los pulsos de luz dentro de la cavidad [25]. Si hay un equilibrio entre las ganancias y las pérdidas de la cavidad y la polarización es la correcta, se generarán pulsos ultracortos (cuya duración depende principalmente de las características del SAM y del FBG), equiespaciados y de amplitud muy estable, que es en definitiva el objetivo del experimento.

Con estos materiales, tras fusionar correctamente y comprobar de nuevo el montaje, se procederá a caracterizar y analizar el láser bajo distintas potencias de bombeo, empleando un analizador de espectros eléctricos (ESA según sus siglas en inglés), el cual nos dará información del espectro de los pulsos y servirá para comprobar que se está bajo régimen de *mode locking*; un OSA, el cual nos mostrará el espectro óptico de la señal dentro de la cavidad, lo que nos ayudará también a comprobar si nos encontramos en el régimen de *mode locking*; y un osciloscopio que nos mostrará la forma de los pulsos temporales.

### 3.4.-Caracterización del láser

Para realizar las medidas y caracterizar el láser conectaremos los distintos dispositivos de medida tal y como se indica en la Figura 3.3:

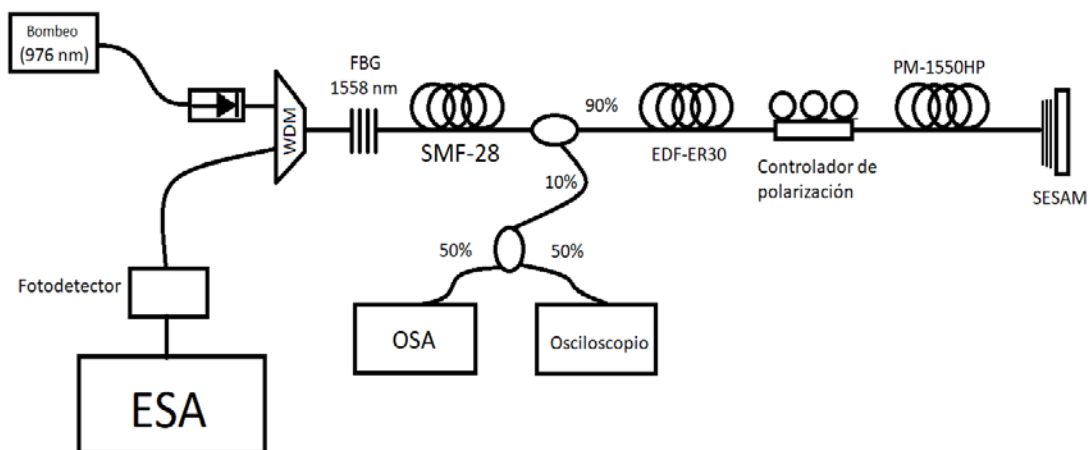


Figura 3.3. Montaje para la caracterización del láser

Con ayuda del software para el control del OSA y el driver CLD1015, como ya hemos comentado previamente, iremos variando la potencia de bombeo y analizando los datos obtenidos por los distintos dispositivos de medida para ver el comportamiento del láser y hallar su rango óptimo de operación. También nos permitirá observar, simultáneamente, los pulsos temporales y sus espectros en el dominio eléctrico y en el dominio óptico.

### 3.4.1.-Dominio óptico

Tras alcanzar la corriente umbral del láser, en el OSA podemos observar un pico estrecho de potencia óptica, debido al filtrado del FBG y centrado a la longitud de onda del mismo. Este pico nos indica que el SAM no se ha saturado y, por tanto, éste no pulsa, por lo que tenemos un haz de luz continuo. Deberemos ajustar la potencia del driver y, además, controlar la polarización en todo momento, ya que las variaciones de potencia de bombeo pueden derivar en que se pierda el estado de *mode locking*.

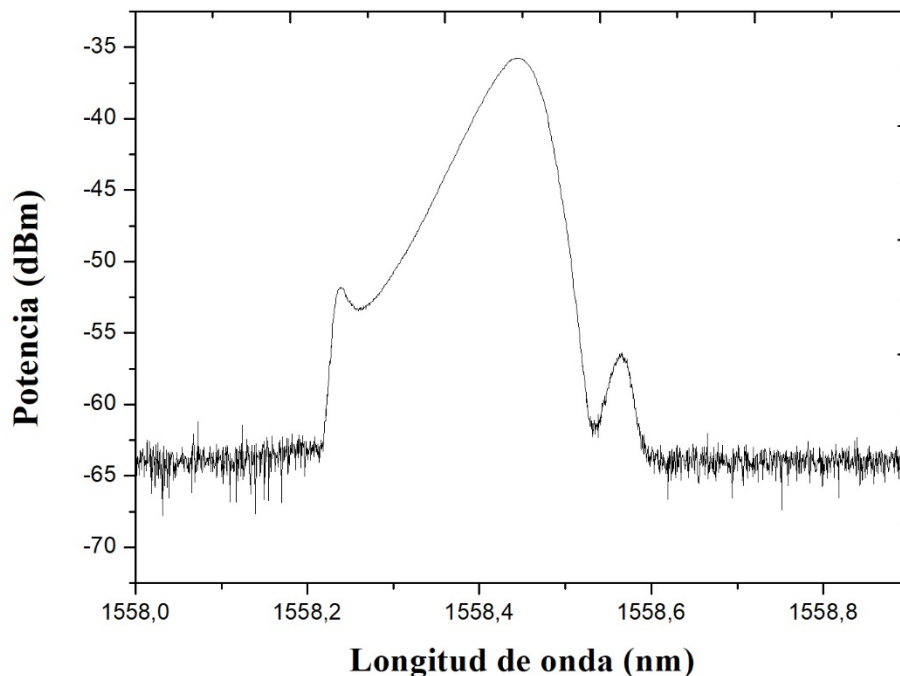


Figura 3.4. Espectro óptico del láser en régimen de *mode locking*



En nuestro caso, el láser funciona correctamente en un rango de corrientes de alimentación que va desde los 120 a 160 mA. Dadas las características del láser empleado para el bombeo, se empieza a producir emisión a potencias superiores a 10 mW, mientras que el *mode locking* y, por tanto, los pulsos, se produce a partir de los 29,6 mW de potencia. Por encima de estos límites el láser también es capaz de funcionar, pero puede ser más inestable [30,31]. La forma del espectro óptico mientras nos encontramos bajo régimen de *mode locking*, con un barrido de potencias dentro del rango de funcionamiento del láser se muestra en la figura 3.5.

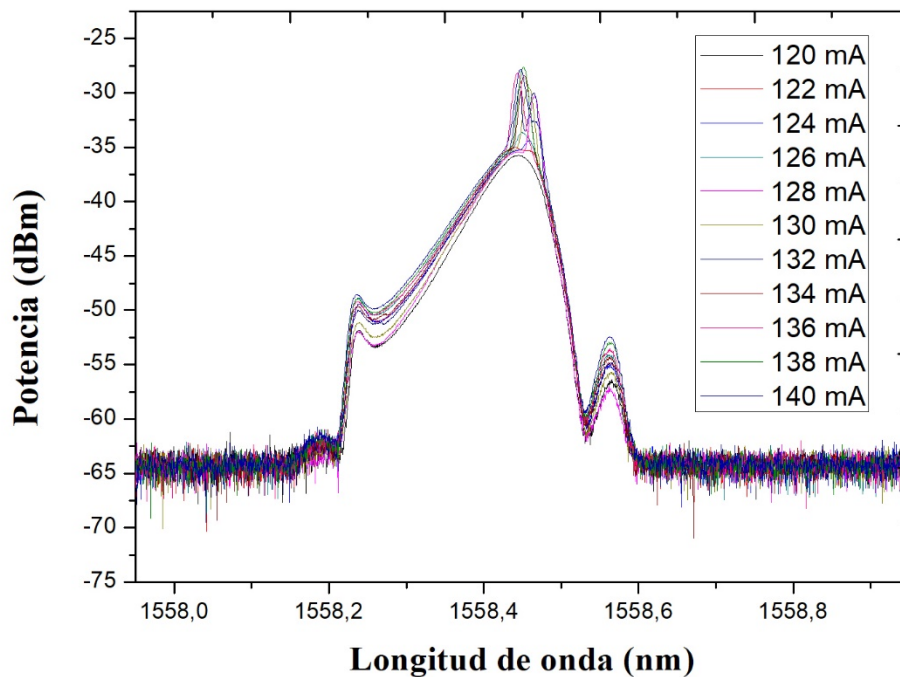


Figura 3.5. Espectro óptico del láser en régimen de *mode locking* de un barrido de intensidad

La forma del espectro óptico varía drásticamente cuando nos encontramos en régimen de *mode locking* [14,20,22,26], debido a que el pulso que se propaga por la cavidad se trata de un solitón, fenómeno que se produce debido a que trabajamos en la zona de dispersión anómala (dispersión negativa). Esta característica de la dispersión hace que, junto a los efectos no lineales, se anulen, dando lugar a este tipo de pulso característico, el cual mantiene su forma temporal y espectral a lo largo de toda la cavidad.

### 3.4.2.-Dominio frecuencial

En el espectro eléctrico podremos observar la tasa de repetición del láser, es decir, la frecuencia con la que se produce un pulso dentro de la cavidad.

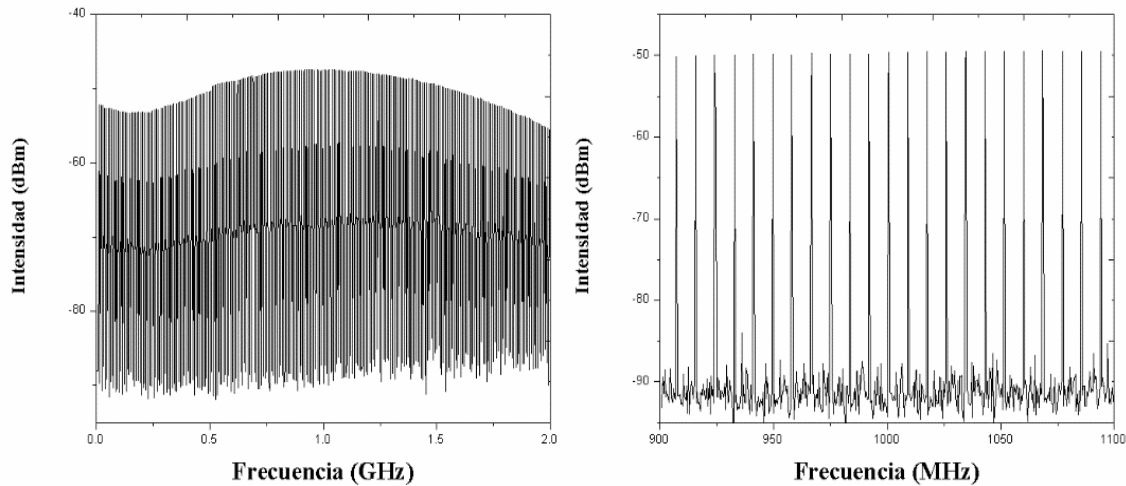


Figura 3.6. Espectro eléctrico del láser en régimen de mode locking

En frecuencia, esta tasa de repetición es de 8,2 MHz, lo que implica una separación temporal entre pulsos de 121,95 ns. Como se ha mencionado antes, la tasa de repetición depende directamente de la longitud de la cavidad, aumentando cuando disminuya el tamaño de la cavidad [22,27,32], puesto que el pulso tardará menos tiempo en recorrerla. Además, se puede cuantificar también la estabilidad en la potencia de los pulsos y la separación entre éstos.

Esta tasa de repetición sigue la siguiente fórmula:

$$f_{rep} = \frac{2c}{L \cdot n}$$

Donde  $L$  es la longitud total de la cavidad,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $n$  es el índice de refracción de la fibra.

### 3.4.2.-Dominio temporal

Con el osciloscopio obtenemos la información de los pulsos temporales, como su duración o la anchura a media altura (FWHM según sus siglas en inglés). La FWHM es la anchura del pulso a la mitad de potencia y para medirlo es necesario hallar los puntos del pulso en los que la potencia cae a la mitad, para ver la distancia temporal entre ellos. En nuestro caso, el pulso tiene una FWHM de 28,2 ps.

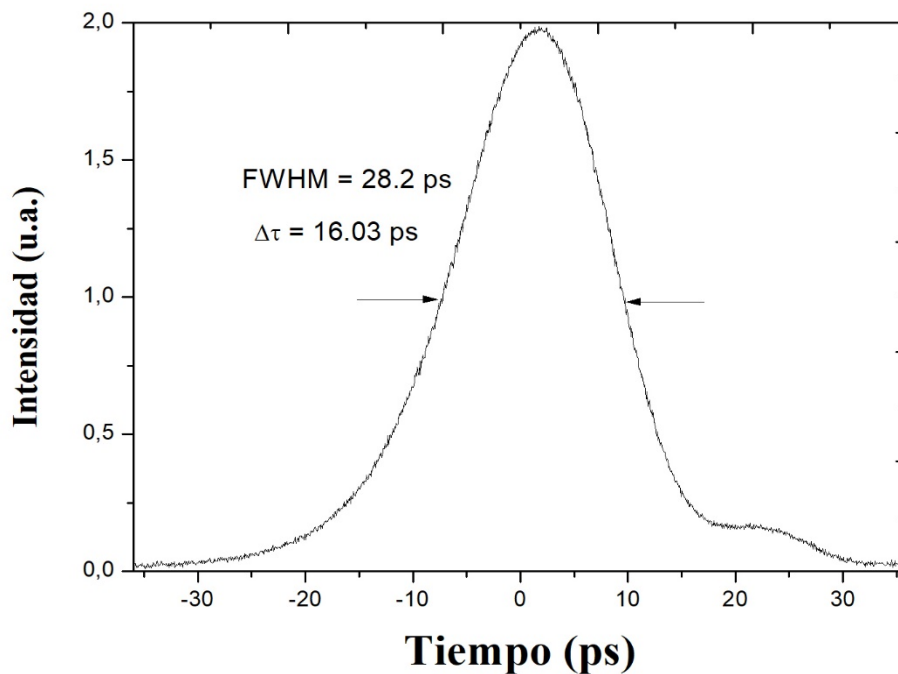


Figura 3.7. Pulso temporal

Cabe destacar que la anchura temporal del pulso depende del tiempo de relajación del SAM, dado por el fabricante. Sin embargo, este tiempo suele ser algo superior al definido cuando el SAM está cerca de la saturación, por lo que puede variar. Pese a esto, lo que afecta realmente a la anchura y hace que ésta no sea similar al tiempo de relajación del SAM es el FBG, ya que éste actúa como un filtro espectral, estrechando el espectro de los pulsos, lo que se traduce en un ensanchamiento temporal de los mismos. En cuanto a la demostración matemática, esta anchura puede aproximarse a partir del espectro óptico mediante la siguiente relación [12-15]:

$$t_p = \frac{0,44}{\Delta\nu} = \frac{0,44 \cdot \lambda^2}{c \cdot \Delta\lambda}$$

Siendo  $\Delta\nu$  la anchura espectral del pulso en el rango frecuencial,  $\lambda$  la longitud central del pulso,  $\Delta\lambda$  la anchura espectral del pulso en el rango de longitud de onda y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Sin embargo, como ya se ha dicho, esta relación es una mera aproximación.

También se ha realizado una serie de barridos de potencia para comprobar la estabilidad de los pulsos en el rango de trabajo, viéndose inalterados frente a la variación de potencia.

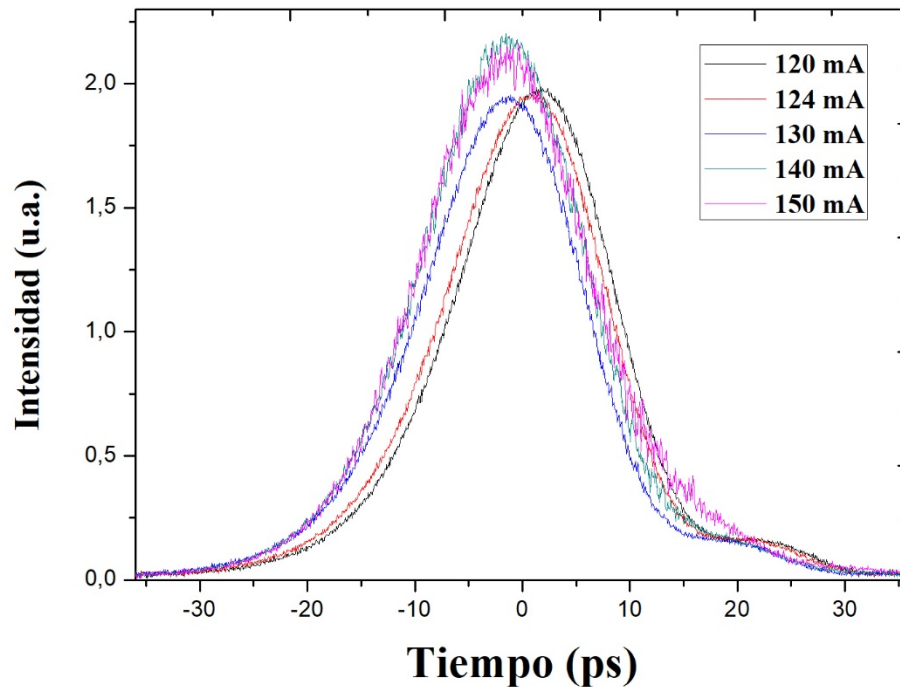


Figura 3.8. Pulsos temporales para un barrido de intensidad de bombeo

Se observa que los pulsos, salvo una pequeña diferencia en amplitud, que no es relevante, mantienen su anchura temporal a pesar del incremento de intensidad en el bombeo.

### 3.5.-Modificación del diseño para obtener un láser pulsado sintonizable

Para concluir el estudio de este láser, se propone un diseño alternativo para obtener un láser sintonizable en longitud de onda. Para ello, con la ayuda de un microposicionador, aplicaremos tensión sobre el FBG de forma que conseguiremos que la longitud de onda del FBG varíe, aprovechando el efecto empleado para los sensores de vibración o de tensión explicados en los fundamentos teóricos.

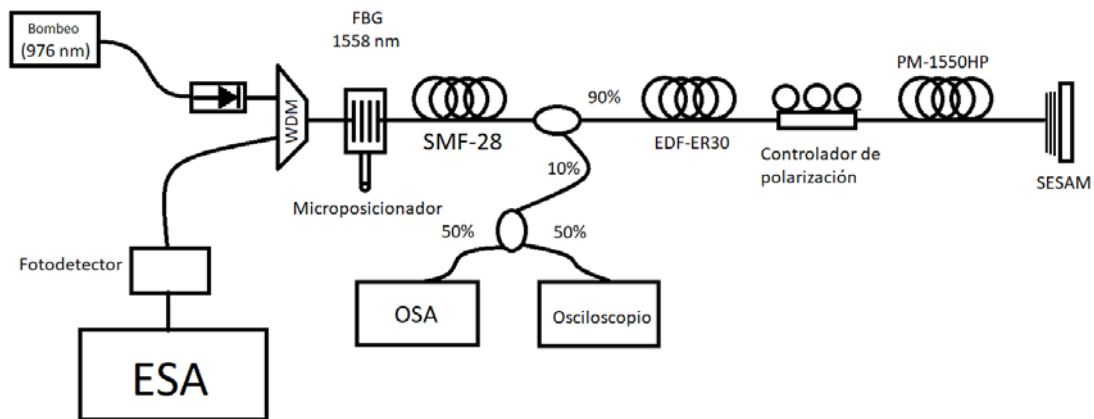


Figura 3.9. Montaje para la caracterización del láser sintonizable

El objetivo de las medidas realizadas es demostrar la estabilidad del láser a pesar del cambio de la longitud de onda, tanto en la potencia como en la anchura de los pulsos y la separación entre ellos [17-18].

Como era de esperar, en el espectro óptico se observa el desplazamiento del espectro en longitud de onda. Cabe destacar que este método no resulta demasiado eficaz, ya que el FBG no soporta demasiada tensión, por lo que no es posible conseguir un rango de sintonía superior a 8 nm. Pese a esto, en ese rango el láser se comporta adecuadamente.

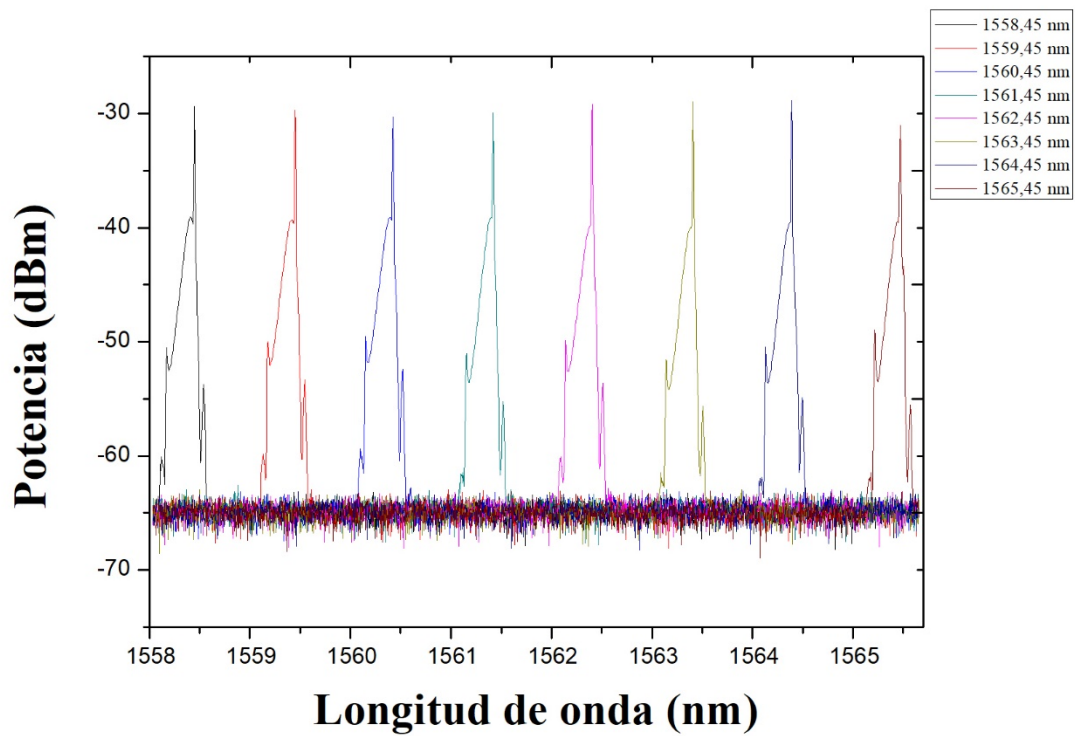


Figura 3.10. Espectro óptico del láser sintonizable con saltos de 1 nm

Las medidas realizadas para obtener el espectro presente en la Figura 3.10 se han hecho para una intensidad de bombeo de 150 mA, centrando la representación del OSA tal y como se indica en la leyenda para un rango de observación de 10 nm. Para esta intensidad se obtiene una más que aceptable potencia óptica, la cual se mantiene prácticamente constante al aplicar cada vez más tensión al FBG, como era de esperar.

### **3.6.-Conclusiones**

Durante el estudio y realización de este experimento se ha demostrado la viabilidad de fabricar un láser todo fibra pulsado sin necesidad de emplear fibra mantenedora de polarización, lo que abarata considerablemente su coste. Sin embargo, como contrapartida, las prestaciones del sistema se ven reducidas.

Con todo ello, se ha demostrado que es posible generar un láser que funcione a bajas potencias, con una anchura de pulsos y una tasa de repetición aceptables, así como una gran potencia de pico.





## CAPÍTULO 4 – CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

A modo de resumen, en las dos partes llevadas a cabo en este proyecto se ha profundizado sobre dos ramas distintas de las comunicaciones ópticas, siendo la primera los sensores, sus características y equipos para recibir y procesar la información que éstos nos proporcionan; y la segunda un láser de pulsos que funciona a bajas potencias y no emplea fibra mantenedora de la polarización (PM), lo que abarata su coste de fabricación. Además, se ha demostrado la capacidad de modificar la longitud de onda de trabajo del láser aplicando tensión sobre el FBG del diseño, sin que esto afecte ni a la potencia ni al funcionamiento del láser.

En cuanto a la primera parte de este proyecto, se ha diseñado y caracterizado un software para el interrogador SI155 de *Micron Optics*, enfatizando en los modos de procesar los datos recibidos para facilitar la interpretación de las medidas realizadas. Dicho software ha sido empleado en diversos tipos de medidas, centrándose este proyecto en un experimento para medir la respiración de una persona y otros experimentos sobre vibración mecánica aplicada a un sensor, las cuales han servido para mostrar las limitaciones del software a la hora de realizar medidas a gran velocidad y procesarlas. Se ha propuesto una solución que solventa parcialmente esta carencia, siendo necesaria la búsqueda de otra solución alternativa para alcanzar las velocidades de toma de datos que el interrogador es capaz de ofrecer.

Por tanto, y para solucionar esto, se proponen dos posibles alternativas: la primera de ellas y la más sencilla, es comprobar el funcionamiento del software en un equipo con una mejor capacidad de procesamiento, para comprobar que realmente la limitación viene impuesta por el lenguaje y el entorno en el que se ha desarrollado el software (en nuestro caso, Matlab). De no ser el hardware la causa de esta limitación, se propone el lenguaje de programación Python, caracterizado por su sencillez en cuanto a sintaxis y conocido por sus buenos resultados a la hora de trabajar con interfaces gráficas. Dado que el código del programa ya está escrito y que el fabricante ofrece librerías gratuitas para Python, será una forma sencilla y rápida de intentar mejorar la velocidad de obtención y procesamiento de los datos del interrogador.

En cuanto a la última sección, donde se ha realizado un láser de pulsos empleando fibra no mantenedora de la polarización, sus características mejorarían notablemente si se emplease fibra PM, a expensas del incremento en el coste del diseño que esto supondría. Tanto la estabilidad del láser como el funcionamiento general del mismo se verían mejorados. Además, se podrían buscar otras alternativas para realizar la sintonización de la frecuencia de trabajo, para intentar ampliar el rango de longitudes de onda.



# BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Amaya Ortigosa Cayetano, “Desarrollo en Matlab de un software para el interrogador SM125 de redes de difracción Bragg en fibra y su aplicación en redes de sensores de fibra óptica”. Trabajo de fin de estudios.
- [2] Miguel López-Higuera, “Handbook of optical fiber sensing technology”. 2002, John Wiley and Sons.
- [3] José Capmany, F. J. Fraile-Peláez, J. Martí. “Fundamentos de comunicaciones Ópticas”. Editorial Síntesis 1998.
- [4] José Capmany, “Dispositivos de Comunicaciones Ópticas”. Editorial Síntesis 1999.
- [5] MICRON OPTICS, *User Guide Optical sensing Instrumentation & Software/ENLIGHT*. 2012.
- [6] B. Culshaw, “The optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 1, p. R1, Jan. 2006.
- [7] Y. Zhao and Y. Liao, “Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–18, Jan. 2004.
- [8] O. Frazão, J. M. T. Baptista, and J. L. Santos, “Recent Advances in High-Birefringence Fiber Loop Mirror,” *Sensors*, vol. 7, no. 11, pp. 2970–2983, Nov. 2007.
- [9] Sanchez, P. , Zamarreño, C.R., Hernaez, M., Matias, I.R., Arregui, F.J., “Optical fiber refractometers based on Lossy Mode Resonances by means of SnO<sub>2</sub> sputtered coatings,” *Sensors and Actuators, B: Chemical* 202, 154-159, (2014)
- [10] Lopez-Aldaba, A., Pinto, A.M.R., Lopez-Amo, M., Frazão, O., Santos, J.L., Baptista, J.M., Baierl, H., Auguste, J.L., Jamier, R. and Roy, P., "Experimental and Numerical Characterization of a Hybrid Fabry-Pérot Cavity for Temperature Sensing," *Sensors* 15, 8042-8053 (2015).
- [11] D. LEANDRO *et al*, "Monitoring Multiple Hi-Bi Sensing Fibers in a Sin-gle Fiber Loop Mirror," *Journal of Lightwave Technology* 34(19), 4543-4549 (2016).
- [12] Keller U., “Recent developments in compact ultrafast lasers,” *Nature*, 424, 831-838 (2003).
- [13] Liu J., “High Retetition-Rate Narrow Bandwidth SAM Mode-Locked Yb-Doped Fiber Lasers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 24 (7), 539-541 (2012).
- [14] Duan, L *et al.*, ‘Experimental observation of dissipative soliton resonance in an anomalous-dispersion fiber laser’, *Opt. Express*, 2012, 20, (1), pp. 265–270
- [15] Wang M., Chen C., Huang C., Chen H., “Passively Q-switched Er-doped fiber laser using a semiconductor saturable absorber mirror,” *Optik*, 125(9), 2154 -2156(2014).

- [16] J. Franz and V. Jain, "Optical Communications Components and Systems". Editorial Narosa
- [17] C. Wu, N. K. Dutta, "High repetition-rate optical pulse generation using a rational harmonic mode-locked fiber laser", IEEE Journal of Quantum Electronics, 36 no. 2, 145-150 (2000)
- [18] J. Yao *et al.*, "Active mode-locking of tunable multiwavelength fiber ring laser", Optics Communications, 191, 341-345 (2001)
- [19] K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus, and L. E. Nelson, "77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser," Opt. Lett. 18, 1080{1082 (1993).
- [20] Lei Zhang, Jiaqi Zhou, Zhaokun Wang, Xijia Gu, and Yan Feng, "SAM Mode-Locked, Environmentally Stable, and Compact Dissipative Soliton Fiber Laser", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL.26, NO. 13, 2014
- [21] Heesuk Jang *et al.*, "Polarization maintaining linear cavity Er-doped fiber femtosecond laser", Laser Phys. Lett. 12(2015) 105102 (7pp)
- [22] Meng Wang, Cong Chen, Qi Li, Kaiqiang Huang, Haiyan Chen, "Passively mode-locked Er-doped fiber laser based on a semiconductor saturable absorber mirror" Proc. of SPIE Vol. 9270, 92701E.
- [23] Xintong Xu *et al.*, "Passively mode-locking erbium-doped fiber lasers with 0.3 nm Single-Walled Carbon Nanotubes", Sci. Rep. 4, 6761; DOI:10.1038/srep06761 (2014).
- [24] C. W. Hoyt, A. Schafer, C. Fredrick, N. Parks, and A. Thomas, "Ultrafast Optics with a Mode-locked Erbium Fiber Laser, National Science Foundation EIR #1208930
- [25] D. Leventry, M. Turner, and D. Mohr, "Mode-locked Erbium Fiber Laser Development," Tech. rep., Bethel University, St. Paul (2013).
- [26] K. Tamura, L. E. Nelson, H. A. Haus, and E. P. Ippen, "Soliton versus nonsoliton operation of fiber ring lasers," Applied Physics Letters 64, 149{151 (1994).
- [28] J.-C. Diels and W. Rudolph, Ultrashort Laser Pulse Phenomena (Academic Press, 2006).
- [29] L. E. Nelson, D. J. Jones, K. Tamura, H. A. Haus, and E. P. Ippen, "Ultrashort-pulse fiber ring lasers," Applied Physics B: Lasers and Optics 65, 277{294 (1997).
- [30] M.J.Hekmat *et al.*, "Stable Linear SESAM Femtosecond fiber laser by use of Faraday Rotator Mirrors", Proc. of SPIE Vol. 10016
- [31] Wu, K., & Shum, P. P. (2013). Compact passively modelocked fiber laser at 1.55 m with low timing jitter of 8 fs. Proceeding of SPIE, Laser Technology for Defense and Security IX, 873313.
- [32] Luis A. Vazquez-Zuniga, Yoonchan Jeong, "Wavelength-Tunable, Passively Mode-Locked Erbium-Doped Fiber Master-Oscillator Incorporating a Semiconductor Saturable Absorber Mirror", Journal of the Optical Society of Korea Vol. 17, No. 2, April 2013, pp. 117-129

# Anexo



Type: PL980P330J (975033230M3)

975nm 330mW fiber module

Inspection data

Serial: 117828816

13110801-1-6

## 1. Absolute maximum Ratings

Parameter	Sym.	Min.	Max.	Unit
Operating Temperature	T(AMB)	-20	75	°C
Storage Temperature	T(ST)	-40	80	°C
Max. LD Forward Current	LD.I(F),MAX		800	mA
Max. LD Reverse Bias Voltage	LD.V(R),MAX		2000	mV

## 2. Optical and Electrical Characteristics

Laser Temperature: 25+/-1 degree °C, Case Temperature: 70+/-1 degree °C

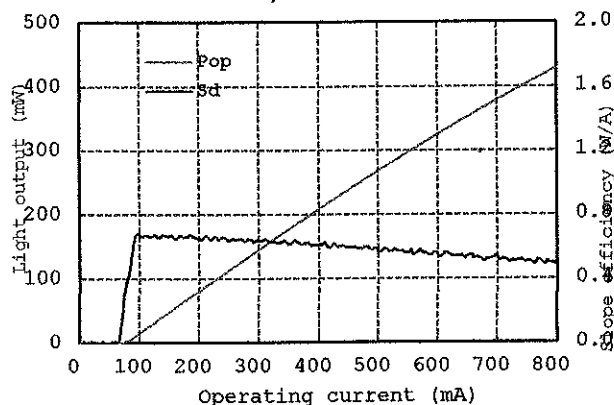
Parameter	Condition	Sym.	Measured	Unit
Threshold Current		I(th)	77.4	mA
Operating Current	P(op)=330mW	I(op)	610	mA
Operating Voltage	P(op)=330mW	V(op)	1.65	V
Center Wavelength	P(op)=330mW	LAMBDA (CEN)	975.6	nm
Spectrum Width	P(op)=330mW Thresh, FWHM	SPECTRUM WIDTH	0.24	nm
Monitor Current	P(op)=330mW PD.V(R)=-5V	IM(op)	2070.0	uA

## 2. TEC Characteristics

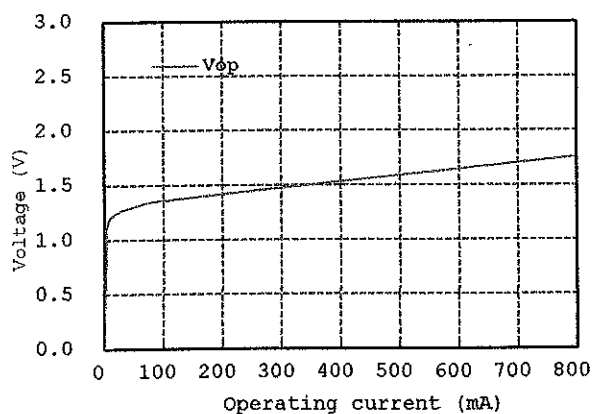
Laser Temperature: 25+/-1 degree °C, Case Temperature: 70+/-1 degree °C

Parameter	Condition	Sym.	Measured	Unit
TEC Current	P(op)=330mW	Itec(op)	1.13	A
TEC Voltage	P(op)=330mW	Vtec(op)	1.95	V

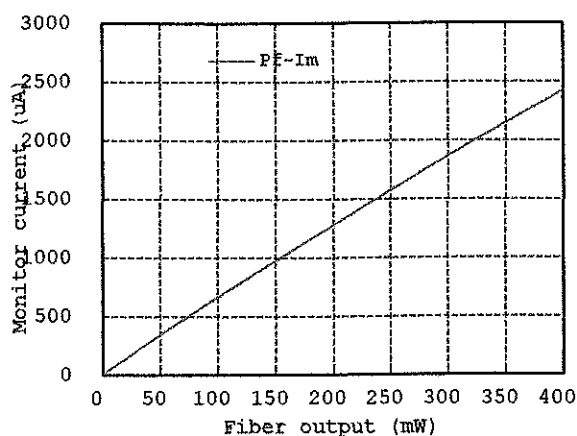
I-L, Sd curves



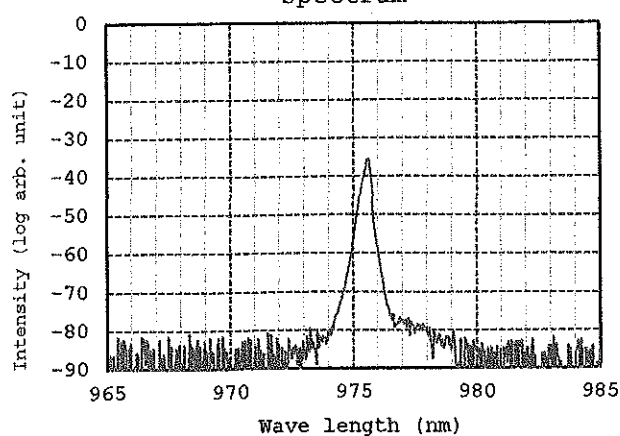
I-V curve



Pf-Im curve



Spectrum



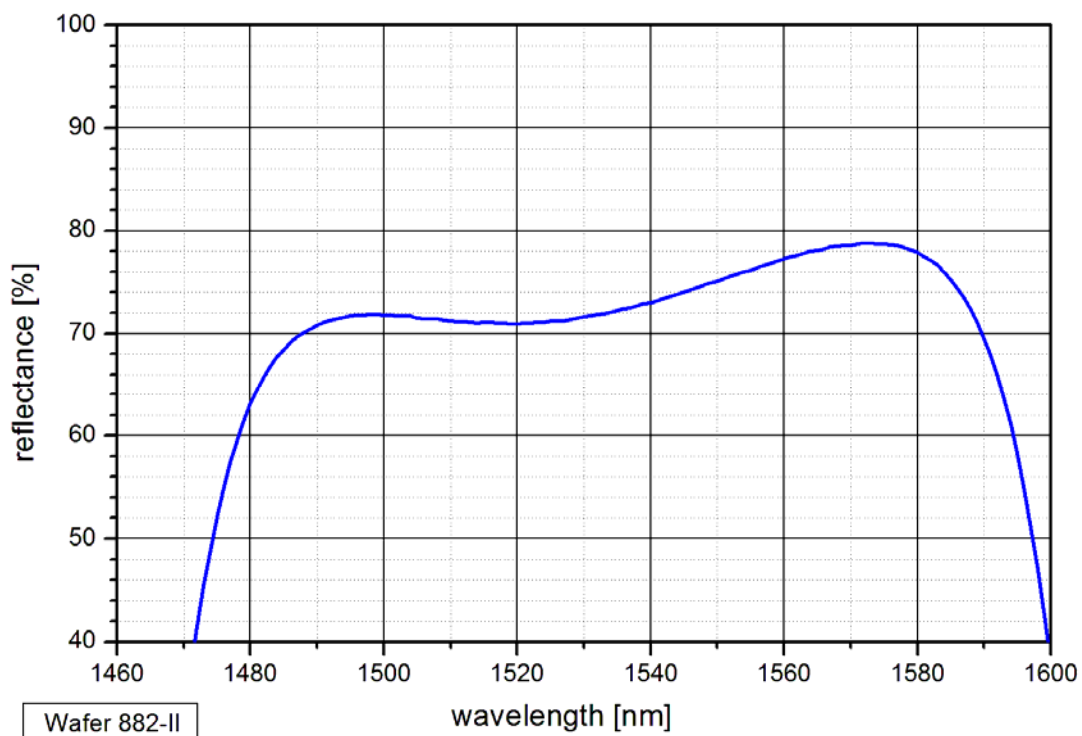
### SAM™ Data Sheet SAM-1550-25-2ps-x, $\lambda = 1550$ nm

Laser wavelength	$\lambda = 1550$ nm
High reflection band	$\lambda = 1490 \dots 1580$ nm
Absorbance	$A_0 = 25$ %
Modulation depth	$\Delta R = 15$ %
Non-saturable loss	$A_{ns} = 10$ %
Saturation fluence	$\Phi_{sat} = 70 \mu\text{J}/\text{cm}^2$
Relaxation time constant	$\tau = 2$ ps
Damage threshold	$\Phi = 800 \mu\text{J}/\text{cm}^2$
Chip area	4 mm x 4 mm; other dimensions on request
Chip thickness	450 $\mu\text{m}$
Protection	the SAM is protected with a dielectric front layer

Mounting option **x** denotes the type of mounting as follows:

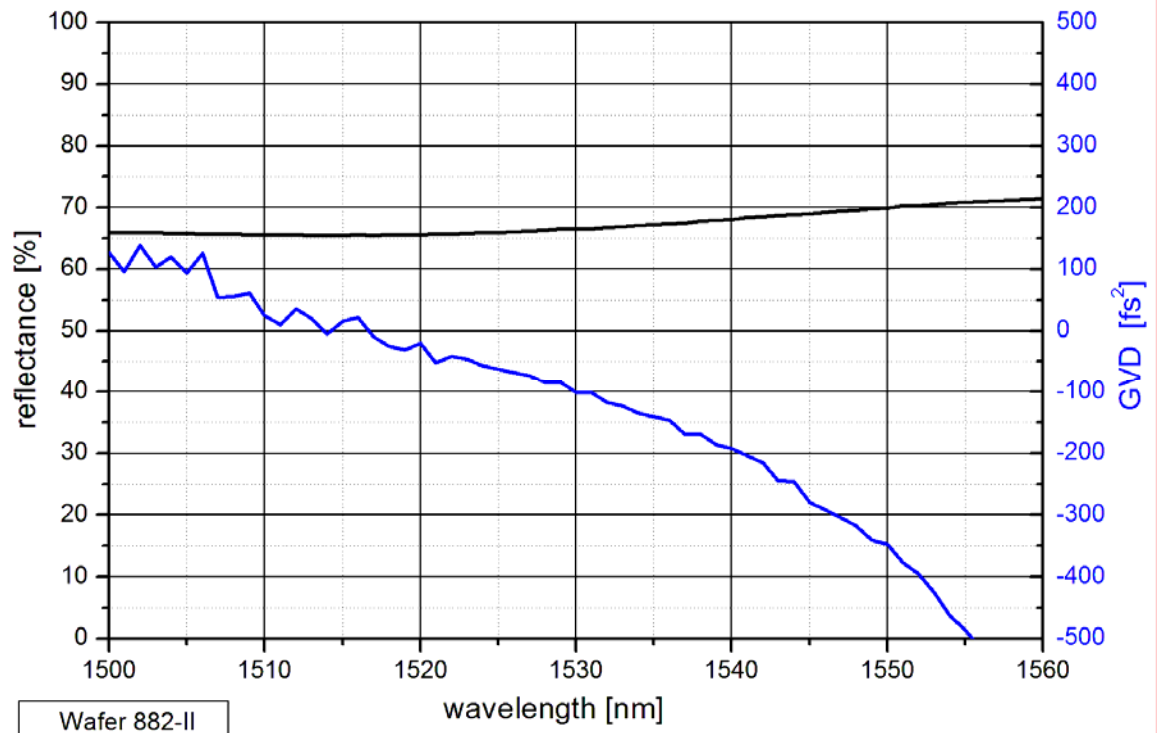
<b>x</b> = 0	unmounted
<b>x</b> = 12.7 g	glued on a gold plated Cu-cylinder with 12.7 mm $\varnothing$
<b>x</b> = 25.4 g	glued on a gold plated Cu-cylinder with 25.4 mm $\varnothing$
<b>x</b> = 12.7 s	soldered on a gold plated Cu-cylinder with 12.7 mm $\varnothing$
<b>x</b> = 25.4 s	soldered on a gold plated Cu-cylinder with 25.4 mm $\varnothing$
<b>x</b> = FC	mounted on a 1 m monomode fiber cable with FC connector

#### Low intensity spectral reflectance





## Dispersion



# 3M Bragg Grating Technologies

206 West Newberry Road  
Bloomfield, CT 06002

Tel. (860) 243-8822  
Fax (860) 243-8699

LabFot100146

REFLECTIVITY: -23.82 dB ( 99.6 %)

DATE: 10/18/96 1:38 PM

CENTER WAVELENGTH: 1560.09 nm

PART No.: C5-96-6686

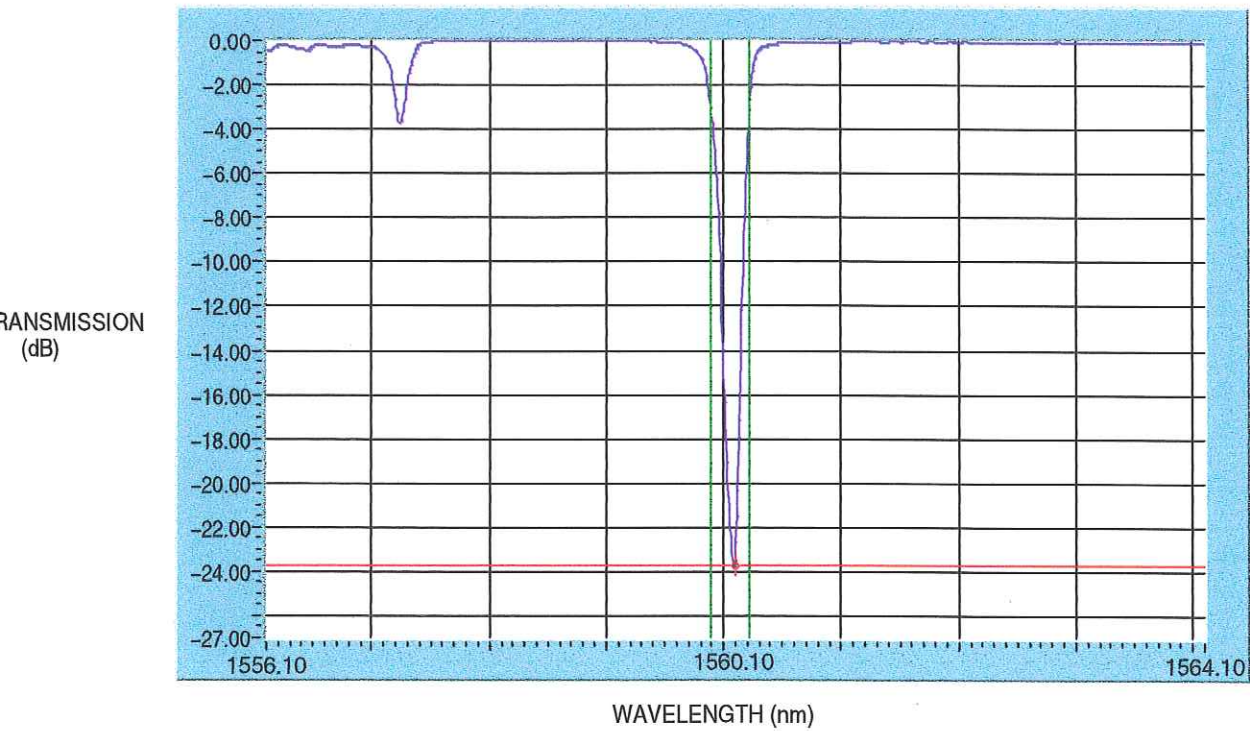
BANDWIDTH: 0.33 nm

SERIAL No.: 6177-2010

RESOLUTION: 0.1 nm

FIBER TYPE: CS-95-4910

BRAGG GRATING SPECTRUM



# 3M Bragg Grating Technologies

206 West Newberry Road  
Bloomfield, CT 06002

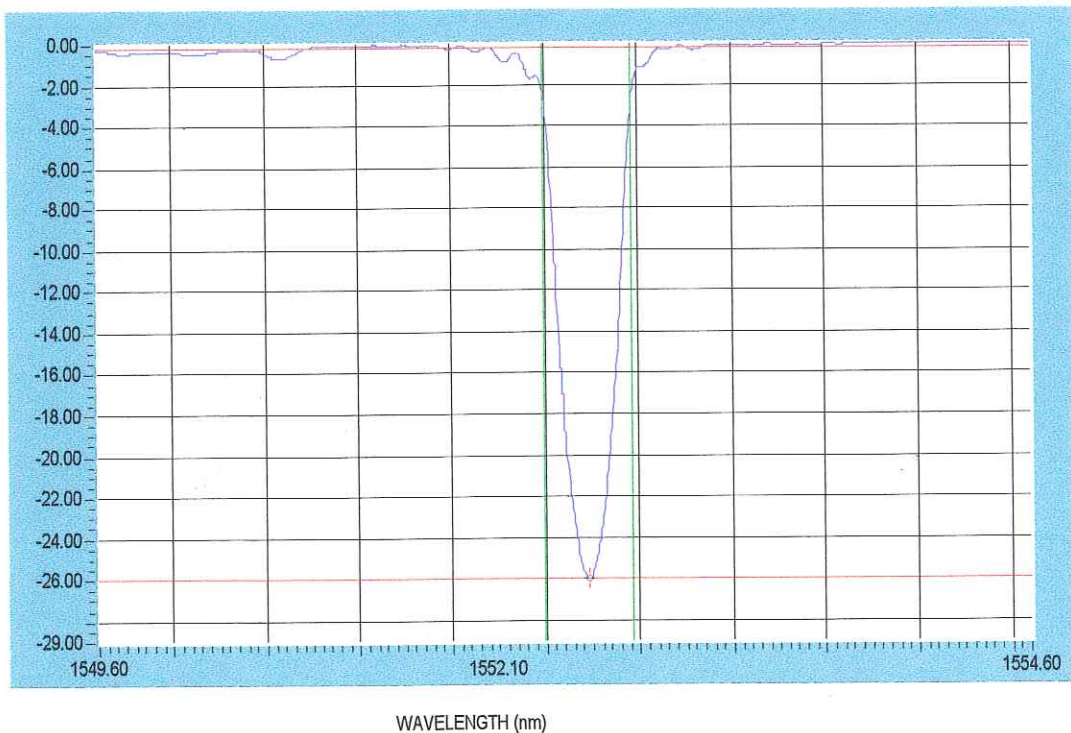
Tel. (860) 243-8822  
Fax (860) 243-8699

REFLECTIVITY: -25.79 dB ( 99.7 % )  
CENTER WAVELENGTH: 1552.23 nm  
BANDWIDTH: 0.48 nm  
RESOLUTION: 0.1 nm

DATE: 12/23/96 12:52 PM  
PART No.: CS-96-6833  
SERIAL No.: 6351-5002  
FIBER TYPE: 536123

BRAGG GRATING SPECTRUM

TRANSMISSION  
(dB)



# 3M Bragg Grating Technologies

206 West Newberry Road  
Bloomfield, CT 06002

Tel. (860) 243-8822  
Fax (860) 243-8699

REFLECTIVITY: -24.42dB ( 99.6 % )

DATE: 2/4/97 3:55 PM

CENTER WAVELENGTH: 1539.60 nm

PART No.: CS-966846

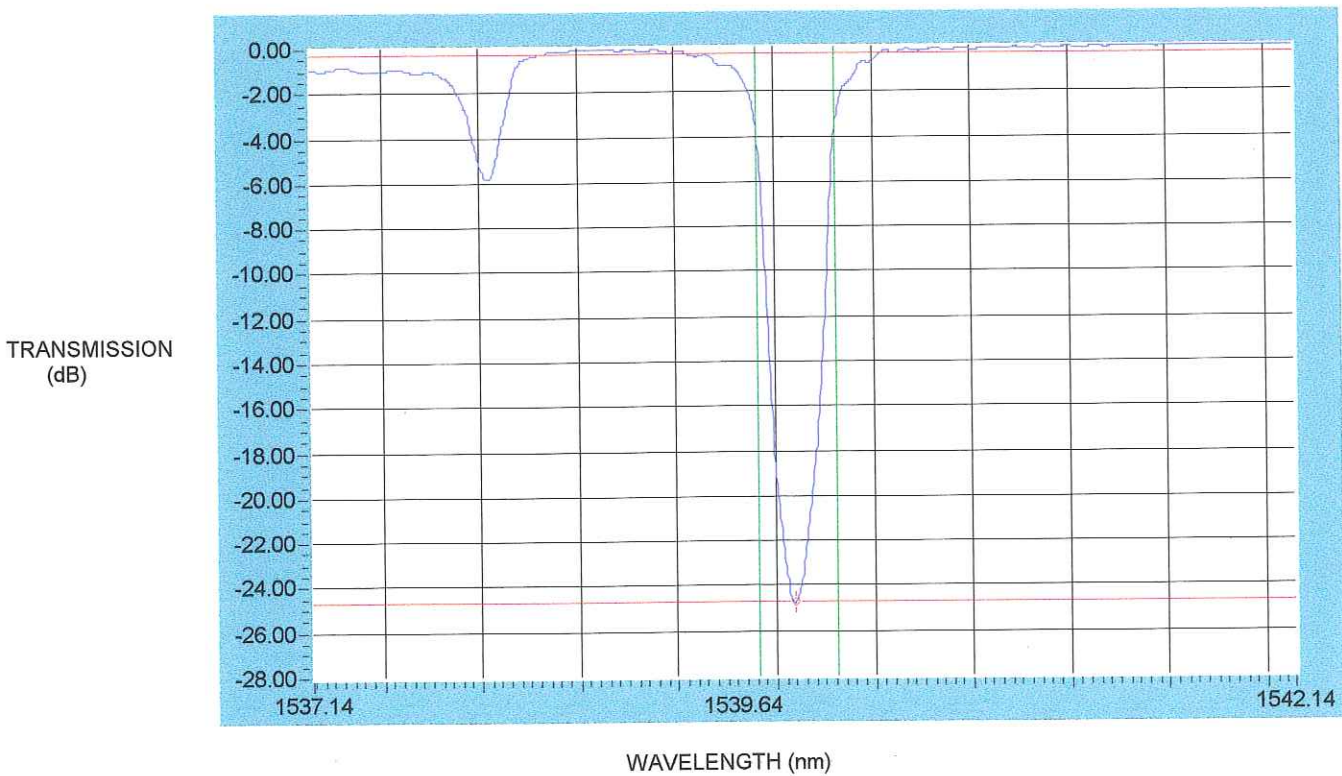
BANDWIDTH: 0.40 nm

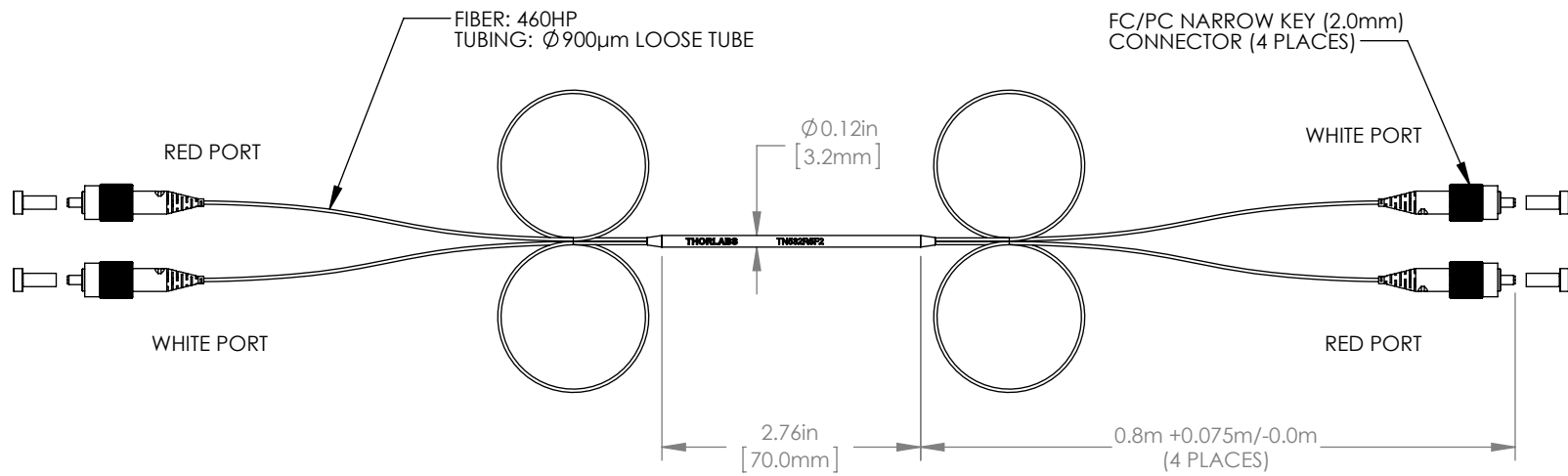
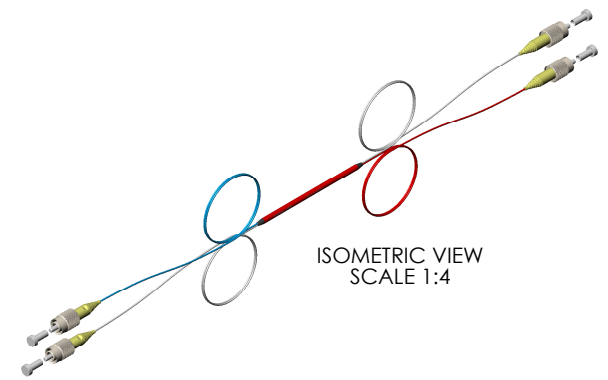
SERIAL No.: 6163-2008

RESOLUTION: 0.1 nm

FIBER TYPE: CS-96-0109

BRAGG GRATING SPECTRUM





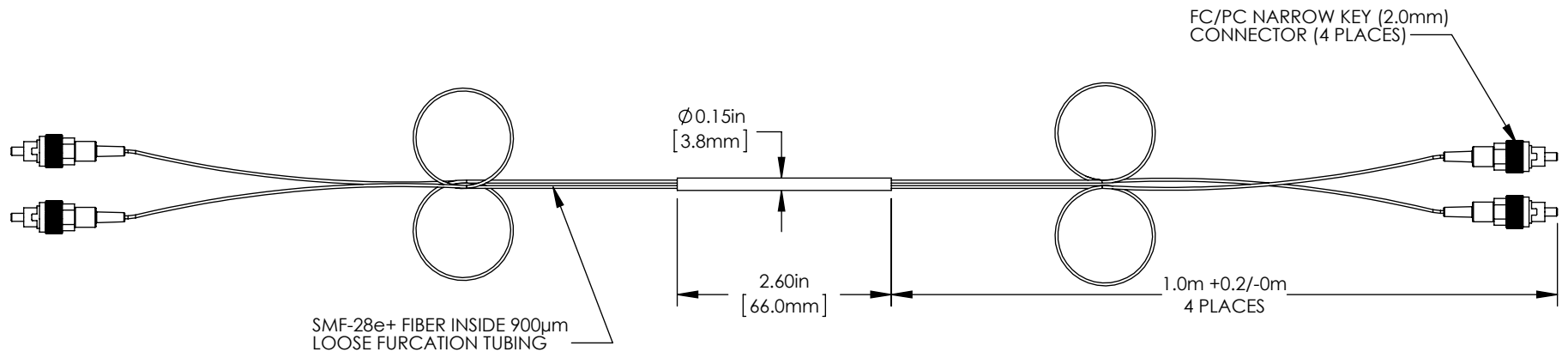
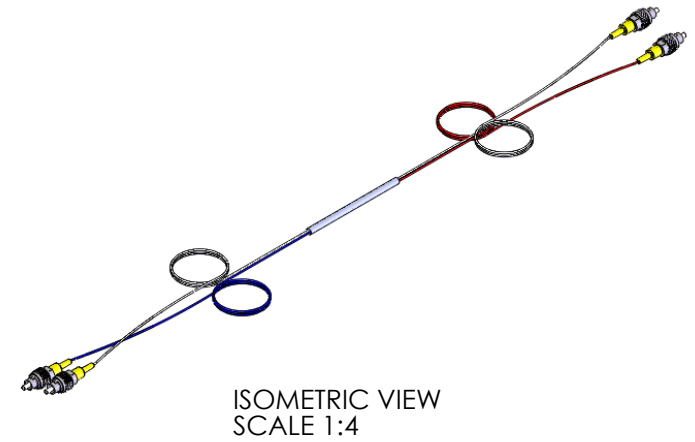


### COUPLER SPECIFICATIONS

CENTER WAVELENGTH	532 nm
MINIMUM BANDWIDTH	±15 nm
COUPLING RATIO	50:50 ±12.0%
INSERTION LOSS	≤4.5 / ≤4.5 dB
EXCESS LOSS	≤0.3 dB
POLARIZATION-DEPENDENT LOSS	≤0.2 dB
ORL / DIRECTIVITY	≥60 dB
MAX POWER LEVEL	100 mW
OPERATING TEMPERATURE °C	-40 °C TO 85 °C
STORAGE TEMPERATURE °C	-40 °C TO 85 °C
ALL VALUES ARE SPECIFIED WITHOUT CONNECTORS	

**FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES**


DRAWING PROJECTION				<b>THORLABS</b> www.thorlabs.com	
	NAME	DATE		Narrowband Fiber Coupler 532nm, 50:50	
DRAWN	DB	16/Mar/16		MATERIAL	
APPROVAL	PB	28/Mar/16		REV A	
COPYRIGHT © 2016 BY THORLABS					
VALUES IN PARENTHESIS ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND OFF ERRORS				ITEM #	APPROX WEIGHT
				TN532R5F2	0.03 kg



COUPLER SPECIFICATIONS	
CENTER WAVE LENGTH	1310/1550 nm
OPERATING BAND WIDTH	$\pm 40$ nm
COUPLING RATIO	90:10
INSERTION LOSS	12.7/0.8 dB
TYPICAL EXCESS LOSS	0.02 dB
PDL	<0.15 dB
DIRECTIVITY	>60 dB
OPERATING TEMPATURE $^{\circ}$ C	-40 TO 85 $^{\circ}$ C

\* ALL SPECIFICATIONS ARE BASED ON NON-CONNECTORIZED MODEL

FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

DRAWING PROJECTION			 www.thorlabs.com	
	NAME	DATE		
DRAWN	TDG	24/OCT/11	2X2, 1310/1550nm SM COUPLER 90:10	
APPROVAL	KH	9/NOV/11	MATERIAL	REV B
COPYRIGHT © 2013 BY THORLABS			N/A	
VALUES IN PARENTHESIS ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND OFF ERRORS			ITEM #	APPROX WEIGHT
			10202A-90-FC	0.11 kg



COMCORE

LabFot100294

## 1x2 1480/1550 WDM Test Report

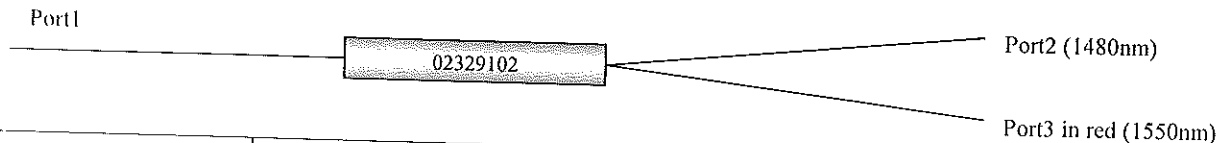
P/N:   
W D M 7 1 0 0 P 8 1 S 1 0S/N:   
0 2 3 2 9 1 0 2Package Size (mm):  $\phi 3 \times 76$ 

Fiber Type: SMF-28e

Pigtail Type: 250 $\mu$ m bare fiberBandwidth: 1480nm $\pm$ 5nm, 1550nm $\pm$ 5nm

Pigtail Length: 1.0m

Connector Type: N/A



Main Spec	IL (dB)	PDL (dB)	Isolation (dB)	RL (dB)
Port1 $\rightarrow$ Port2	0.09	< 0.10	23.19	>50 for each port
Port1 $\rightarrow$ Port3 (red)	0.07		22.52	

\* All data were measured at central wavelength in room temperature.

Checked by



Date: 11/28/06

QA by



Add: 351 Guoshoujing Rd, Bldg 2, Zhangjiang High-Tech Park, Pudong, Shanghai, 201203, P.R.China  
 Tel: 86-21-50802858 Fax: 86-21-50802750 Website: www.comcore.com





### Description

Thorlabs' polarization-maintaining fibers, designed for use from 1440 to 1625 nm, are optimized for data and telecoms applications where ultra-low attenuation over long distances, resistance to radiation-induced damage, and color center formation are critical.

**PM1550-HP**

### Specifications

Geometrical & Mechanical	
Core Diameter	8.5 $\mu\text{m}$
Cladding Diameter	125 $\pm$ 2 $\mu\text{m}$
Coating Diameter	245 $\pm$ 15 $\mu\text{m}$
Core-Clad Offset	<0.5 $\mu\text{m}$
Coating Concentricity	$\leq$ 5 $\mu\text{m}$
Coating Material	UV Cured, Dual Acrylate
Operating Temperature	-40 to 85 $^{\circ}\text{C}$
Proof Test Level	200 kpsi (1.4 GN/m <sup>2</sup> )

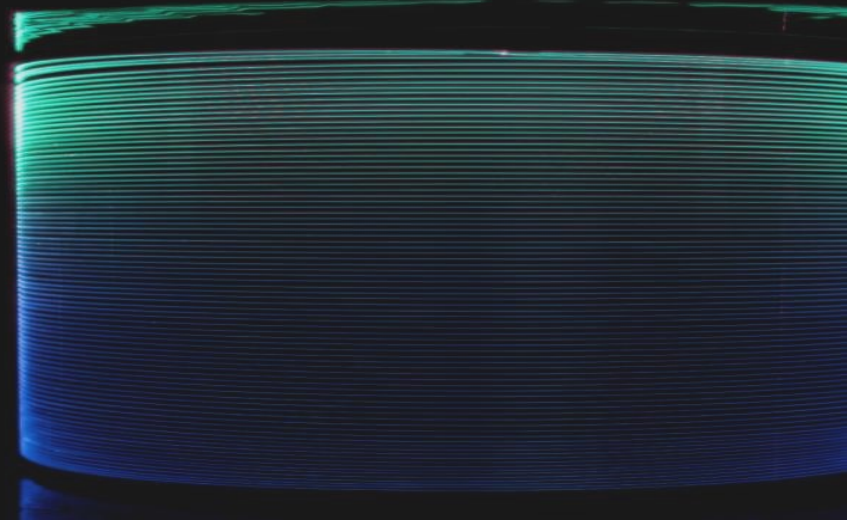
Optical	
Numerical Aperture	0.13
Attenuation	<1 dB/km @ 1550 nm
Operating Wavelength	1440 - 1625 nm
Second Mode Cut-off	1370 $\pm$ 70 nm
Mode Field Diameter (1/e <sup>2</sup> fit - near field)	10.5 $\pm$ 0.8 $\mu\text{m}$ @ 1550 nm
Beat Length	$\leq$ 5 mm @ 1550 nm
Normalized Cross Talk	$\leq$ -40 dB @ 4 m
	$\leq$ -30 dB @ 100 m (nominal)





LIEKKI® Er30-4/125 fibers are highly doped erbium fibers designed for C- and L-band amplifiers, and ASE sources. These fibers are available as low cut-off fibers (Er30-4/125) and high cut-off fibers (Er30-4/125HC).

The high cut-off version has demonstrated the highest power conversion efficiency available in L-band: better than 50% for a typical fiber length of 20 m.



## Features

- Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape
- Very short application length reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS
- Wide and flat spectrum
- Low polarization mode dispersion, typical value <25 fs/m
- Dual layer UV-cured acrylate coating
- Suitable for both 980 nm and 1480 nm pumping
- Telecom-like geometry with good spliceability to standard single mode fibers
- Telcordia GR-1312-CORE Generic Requirements qualified

## Applications

- C- and L-band DWDM, Metro and CATV
- ASE sources

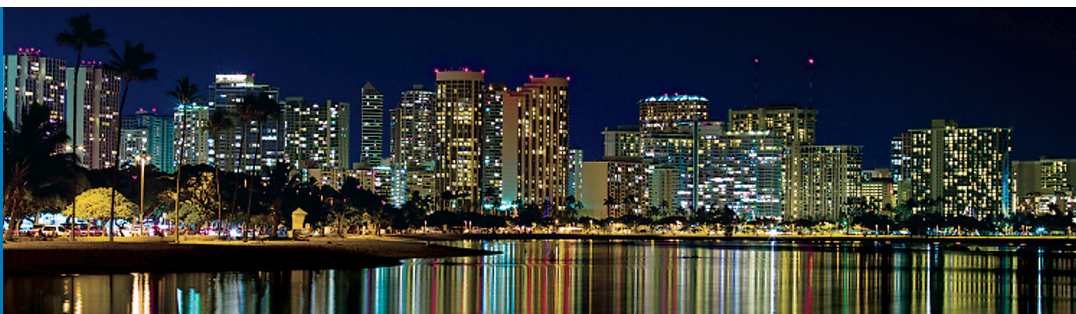
## Typical Fiber Specifications

Fiber		LIEKKI® Er30-4/125	LIEKKI® Er30-4/125HC
Optical	Units		
Mode Field Diameter at 1550 nm	μm	6.5 ± 0.5	6.5 ± 0.5
Peak Core Absorption at 1530 nm	dB/m	30.0 ± 3.0	30.0 ± 3.0
Core Numerical Aperture (nominal)		0.2	0.2
Cut-off Wavelength	nm	890 ± 90	1200 ± 200
Geometrical and mechanical			
Core Concentricity Error, ≤	μm	0.7	0.7
Cladding Diameter (flat-to-flat)	μm	125 ± 2	125 ± 2
Cladding Geometry		Round	Round
Coating Diameter		245 ± 15	245 ± 15
Coating Material		Dual coated high index acrylate	Dual coated high index acrylate
Proof Test, ≥	kpsi	100	100

# Corning® SMF-28e+® Optical Fiber

## Product Information

CORNING



Corning® SMF-28e+® optical fiber is the industry leader in comprehensive single-mode fiber performance for metro and access networks. It is ITU-T Recommendation G.652.D-compliant and fully backward compatible with legacy standard single-mode fibers. SMF-28e+ fiber is built on Corning's solid foundation of quality and proven performance. Since Corning brought the first fiber to market more than 40 years ago, Corning's leadership in single-mode fiber innovation has been unparalleled.

### Optical Specifications

#### Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	≤ 0.35
1383**	≤ 0.35
1490	≤ 0.24
1550	≤ 0.20
1625	≤ 0.23

\* Alternate attenuation offerings available upon request.

\*\* Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

#### Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. $\lambda$ (nm)	Max. $\alpha$ Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength ( $\lambda$ ) by more than the value  $\alpha$ .

#### Macro Bend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.03
50	100	1310	≤ 0.03
50	100	1550	≤ 0.03
60	100	1625	≤ 0.03

\*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

#### Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

#### Cable Cutoff Wavelength ( $\lambda_{cc}$ )

$\lambda_{cc} \leq 1260$  nm

#### Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD ( $\mu$ m)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

#### Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm·km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength ( $\lambda_0$ ): 1304 nm ≤  $\lambda_0$  ≤ 1324 nm

Zero Dispersion Slope ( $S_0$ ): ≤ 0.092 ps/(nm<sup>2</sup>·km)

#### Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Design Value	≤ 0.06*
Maximum Individual Fiber PMD	≤ 0.1

\*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD<sub>0</sub>). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.

#### How to Order

Contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department:  
Ph: 1-607-248-2000 (U.S. and Canada)  
+44-1244-525-320 (Europe)  
Email: [cofic@corning.com](mailto:cofic@corning.com)  
Please specify the fiber type, attenuation, and quantity when ordering.



## Dimensional Specifications

### Glass Geometry

Fiber Curl	$\geq 4.0$ m radius of curvature
Cladding Diameter	$125.0 \pm 0.7$ $\mu$ m
Core-Clad Concentricity	$\leq 0.5$ $\mu$ m
Cladding Non-Circularity	$\leq 0.7\%$

### Coating Geometry

Coating Diameter	$242 \pm 5$ $\mu$ m
Coating-Cladding Concentricity	$< 12$ $\mu$ m

## Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm, 1550 nm, and 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	$\leq 0.05$
Temperature Humidity Cycling	-10°C to +85°C up to 98% RH	$\leq 0.05$
Water Immersion	23°C $\pm$ 2°C	$\leq 0.05$
Heat Aging	85°C $\pm$ 2°C	$\leq 0.05$
Damp Heat	85°C at 85% RH	$\leq 0.05$

\*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

## Mechanical Specifications

### Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress  $\geq 100$  kpsi (0.69 GPa).\*

\*Higher proof test levels available.

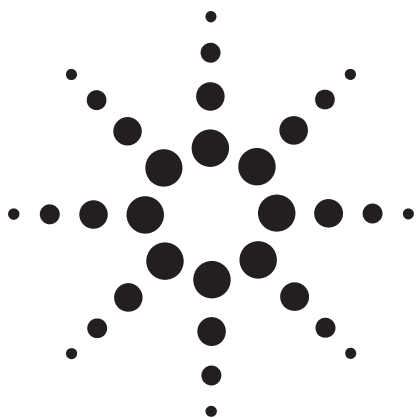
### Length

Fiber lengths available up to 63.0 km/spool.

## Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter	8.2 $\mu$ m
Numerical Aperture	0.14 NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.
Effective Group Index of Refraction ( $N_{eff}$ )	1310 nm: 1.4674 1550 nm: 1.4679
Fatigue Resistance Parameter ( $N_d$ )	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1310 nm: -77 dB 1550 nm: -82 dB



# Agilent 33220A 20 MHz Function/Arbitrary Waveform Generator

## Data Sheet

- 20 MHz Sine and Square waveforms
- Pulse, Ramp, Triangle, Noise, and DC waveforms
- 14-bit, 50 MSa/s, 64 K-point Arbitrary waveforms
- AM, FM, PM, FSK, and PWM modulation types
- Linear & logarithmic sweeps and burst operation
- 10 mV<sub>pp</sub> to 10 V<sub>pp</sub> amplitude range
- Graph mode for visual verification of signal settings
- Connect via USB, GPIB and LAN

### Uncompromising performance for functions and waveforms

The Agilent Technologies 33220A Function/Arbitrary Waveform Generator uses direct digital synthesis (DDS) techniques to create a stable, accurate output signal for clean, low distortion sine waves. It also gives you square waves with fast rise and fall times up to 20 MHz and linear ramp waves up to 200 kHz.

### Pulse Generation

The 33220A can generate variable-edge-time pulses up to 5 MHz. With variable period, pulse width, and amplitude the 33220A is ideally suited to a wide variety of applications requiring a flexible pulse signal.

### Custom waveform generation

Use the 33220A to generate complex custom waveforms. With 14-bit resolution, and a sampling rate of 50 MSa/s, the 33220A gives you the flexibility to create the waveforms you need. It also lets you store up to four waveforms in nonvolatile memory.

The Agilent IntuiLink Arbitrary Waveform software allows you to easily create, edit, and download complex waveforms using the waveform editor. Or you can capture a waveform using IntuiLink for Oscilloscope and send it to the 33220A for output. To find out more about IntuiLink, visit [www.agilent.com/find/intuilink](http://www.agilent.com/find/intuilink).

### Easy-to-use functionality

Front-panel operation of the 33220A is straightforward and user friendly. You can access all major functions with a single key or two. The knob or numeric keypad can be used to adjust frequency, amplitude, offset, and other parameters. You can



even enter voltage values directly in V<sub>pp</sub>, V<sub>rms</sub>, dBm, or as high and low levels. Timing parameters can be entered in Hertz (Hz) or seconds.

Internal AM, FM, PM, FSK, and PWM modulation make it easy to modulate waveforms without the need for a separate modulation source. Linear and logarithmic sweeps are also built in, with sweep rates selectable from 1 ms to 500 s. Burst mode operation allows for a user-selected number of cycles per period of time. GPIB, LAN, and USB interfaces are all standard, plus you get full programmability using SCPI commands.

### External Frequency Reference (Option 001)

The 33220A external frequency reference lets you synchronize to an external 10 MHz clock, to another 33220A, or to an Agilent 33250A. Phase adjustments can be made from the front panel or via a computer interface, allowing precise phase calibration and adjustment.

### 3-Year Warranty

With your 33220A, you get operating and service manuals, a quick reference guide, test data, and a full 3-year warranty, all for one low price.



**Agilent Technologies**

**WAVEFORMS**

Standard	Sine, Square, Ramp, Triangle, Pulse, Noise, DC
Built-in arbitrary	Exponential rise, Exponential fall, Negative ramp, Sin(x)/x, Cardiac

**WAVEFORM CHARACTERISTICS****Sine**

Frequency Range	1 $\mu$ Hz to 20 MHz
Amplitude Flatness <sup>[1],[2]</sup>	(relative to 1 kHz)
	< 100 kHz 0.1 dB
	100 kHz to 5 MHz 0.15 dB
	5 MHz to 20 MHz 0.3 dB

Harmonic distortion <sup>[2],[3]</sup>	< 1 V <sub>PP</sub>	$\geq$ 1 V <sub>PP</sub>
DC to 20 kHz	-70 dBc	-70 dBc
20 kHz to 100 kHz	-65 dBc	-60 dBc
100 kHz to 1 MHz	-50 dBc	-45 dBc
1 MHz to 20 MHz	-40 dBc	-35 dBc

Total harmonic distortion <sup>[2],[3]</sup>	
DC to 20 kHz	0.04%

Spurious (non-harmonic) <sup>[2],[4]</sup>	
DC to 1 MHz	-70 dBc
1 MHz to 20 MHz	-70 dBc + 6 dB/octave

Phase noise (10 kHz offset)	-115 dBc / Hz, typical
--------------------------------	------------------------

**Square**

Frequency range	1 $\mu$ Hz to 20 MHz
Rise/Fall time	< 13 ns
Overshoot	< 2%
Variable duty cycle	20% to 80% (to 10 MHz) 40% to 60% (to 20 MHz)

Asymmetry (@ 50% duty)	1% of period + 5 ns
Jitter (RMS)	1 ns + 100 ppm of period

**Ramp, Triangle**

Frequency range	1 $\mu$ Hz to 200 kHz
Linearity	< 0.1% of peak output
Variable Symmetry	0.0% to 100.0%

**Pulse**

Frequency range	500 $\mu$ Hz to 5 MHz
Pulse width (period $\leq$ 10s)	20 ns minimum, 10 ns resolution
Variable edge time	< 13 ns to 100 ns
Overshoot	< 2%
Jitter (RMS)	300 ps + 0.1 ppm of period

**Noise**

Bandwidth	10 MHz typical
-----------	----------------

**Arbitrary**

Frequency range	1 $\mu$ Hz to 6 MHz
Waveform length	2 to 64 K points
Amplitude resolution	14 bits (including sign)
Sample rate	50 MSa/s
Min. Rise/Fall Time	35 ns typical
Linearity	< 0.1% of peak output
Settling Time	< 250 ns to 0.5% of final value
Jitter (RMS)	6 ns + 30 ppm
Non-volatile memory	four waveforms

**COMMON CHARACTERISTICS****Amplitude**

Range	10 mV <sub>PP</sub> to 10 V <sub>PP</sub> into 50 $\Omega$ 20 mV <sub>PP</sub> to 20 V <sub>PP</sub> into open circuit
-------	---

Accuracy <sup>[1],[2]</sup> (at 1 kHz)	$\pm$ 1% of setting $\pm$ 1 mV <sub>PP</sub>
--	--

Units	V <sub>PP</sub> , V <sub>rms</sub> , dBm
-------	--

Resolution	4 digits
------------	----------

**DC Offset**

Range (peak AC + DC)	$\pm$ 5 V into 50 $\Omega$ $\pm$ 10 V into open circuit
----------------------	--

Accuracy <sup>[1],[2]</sup>	$\pm$ 2% of offset setting $\pm$ 0.5% of amplitude $\pm$ 2 mV
-----------------------------	--

Resolution	4 digits
------------	----------

**Main Output**

Impedance	50 $\Omega$ typical
-----------	---------------------

Isolation	42 Vpk maximum to earth
-----------	-------------------------

Protection	Short-circuit protected, overload automatically disables main output
------------	--

**Internal Frequency Reference**

Accuracy <sup>[5]</sup>	$\pm$ 10 ppm in 90 days $\pm$ 20 ppm in 1 year
-------------------------	---

**External Frequency Reference (Option 001)**

Rear Panel Input	
------------------	--

Lock Range	10 MHz $\pm$ 500 Hz
------------	---------------------

Level	100 mV <sub>PP</sub> to 5 V <sub>PP</sub>
-------	---

Impedance	1 k $\Omega$ typical, AC coupled
-----------	----------------------------------

Lock Time	< 2 seconds
-----------	-------------

Rear Panel Output	
-------------------	--

Frequency	10 MHz
-----------	--------

Level	632 mV <sub>PP</sub> (0 dBm), typical
-------	---------------------------------------

Impedance	50 $\Omega$ typical, AC coupled
-----------	---------------------------------

Phase Offset	
--------------	--

Range	+ 360° to - 360°
-------	------------------

Resolution	0.001°
------------	--------

Accuracy	20 ns
----------	-------

**MODULATION****AM**

Carrier waveforms	Sine, Square, Ramp, Arb
-------------------	-------------------------

Source	Internal/External
--------	-------------------

Internal modulation	Sine, Square, Ramp, Triangle, Noise, Arb (2 mHz to 20 kHz)
---------------------	---

Depth	0.0% to 120.0%
-------	----------------

**FM**

Carrier waveforms	Sine, Square, Ramp, Arb
-------------------	-------------------------

Source	Internal/External
--------	-------------------

Internal modulation	Sine, Square, Ramp, Triangle, Noise, Arb (2 mHz to 20 kHz)
---------------------	---

Deviation	DC to 10 MHz
-----------	--------------

**PM**

Carrier waveforms	Sine, Square, Ramp, Arb
-------------------	-------------------------

Source	Internal/External
--------	-------------------

Internal modulation	Sine, Square, Ramp, Triangle, Noise, Arb (2 mHz to 20 kHz)
---------------------	---

Deviation	0.0 to 360.0 degrees
-----------	----------------------

**PWM**

Carrier waveform	Pulse
Source	Internal/External
Internal modulation	Sine, Square, Ramp, Triangle, Noise, Arb (2 mHz to 20 kHz)
Deviation	0% to 100% of pulse width

**FSK**

Carrier waveforms	Sine, Square, Ramp, Arb
Source	Internal/External
Internal modulation	50% duty cycle square (2 mHz to 100 kHz)

**External Modulation Input<sup>[6]</sup>** (for AM, FM, PM, PWM)

Voltage range	± 5 V full scale
Input impedance	5 kΩ typical
Bandwidth	DC to 20 kHz

**SWEEP**

Waveforms	Sine, Square, Ramp, Arb
Type	Linear or Logarithmic
Direction	Up or Down
Sweep time	1 ms to 500 s
Trigger	Single, External, or Internal
Marker	falling edge of sync signal (programmable frequency)

**BURST<sup>[7]</sup>**

Waveforms	Sine, Square, Ramp, Triangle, Pulse, Noise, Arb
Type	Counted (1 to 50,000 cycles), Infinite, Gated
Start/Stop Phase	-360° to +360°
Internal Period	1 μs to 500 s
Gate Source	External trigger
Trigger source	Single, External or Internal

**TRIGGER CHARACTERISTICS**

Trigger input	
Input level	TTL compatible
Slope	Rising or Falling, selectable
Pulse width	> 100 ns
Input impedance	>10 kΩ, DC coupled
Latency	< 500 ns
Jitter (rms)	6 ns (3.5 ns for pulse)
Trigger output	
Level	TTL compatible into ≥ 1 kΩ
Pulse width	> 400 ns
Output Impedance	50 Ω, typical
Maximum rate	1 MHz

**PROGRAMMING TIMES (typical)**

Configuration times	USB	LAN	GPIO
Function Change	99 ms	100 ms	99 ms
Frequency Change	3 ms	5 ms	2 ms
Amplitude Change	36 ms	36 ms	36 ms
Select User Arb	111 ms	112 ms	109 ms
Arb Download Times (binary transfer)			
	USB	LAN	GPIO
64K points	101 ms	250 ms	356 ms
16K points	26 ms	62 ms	87 ms
4K points	8 ms	20 ms	22 ms

**GENERAL**

Power Supply	CAT II 100 - 240V @ 50/60Hz (-5%, +10%) 100 - 120V @ 400Hz (±10%)
Power Consumption	50 VA max
Operating Environment	IEC 61010 Pollution Degree 2 Indoor Location
Operating Temperature	0°C to 55°C
Operating Humidity	5% to 80% RH, non-condensing
Operating Altitude	Up to 3000 meters
Storage Temperature	-30°C to 70°C
State Storage Memory	Power off state automatically saved. Four user-configurable stored states
Interface	USB, GPIO, and LAN standard
Language	SCPI - 1993, IEEE-488.2
Dimensions (W x H x D)	
Bench top	261.1mm x 103.8mm x 303.2mm
Rack mount	212.8mm x 88.3mm x 272.3mm
Weight	3.4 kg (7.5 lbs)
Safety Designed to	UL-1244, CSA 1010, EN61010
EMC Tested to	MIL-461C, EN55011, EN50082-1
Vibration and Shock	MIL-T-28800, Type III, Class 5
Acoustic Noise	30 dBA
Warm-up Time	1 hour
Warranty	3 years standard

**Footnotes**

<sup>[1]</sup> add 1/10th of output amplitude and offset spec per °C for operation outside the range of 18°C to 28°C

<sup>[2]</sup> Autorange enabled

<sup>[3]</sup> DC offset set to 0 V

<sup>[4]</sup> spurious noise at low amplitude is limited by -75 dBm typical

<sup>[5]</sup> add 10 ppm for operation outside the range of 18°C to 28°C

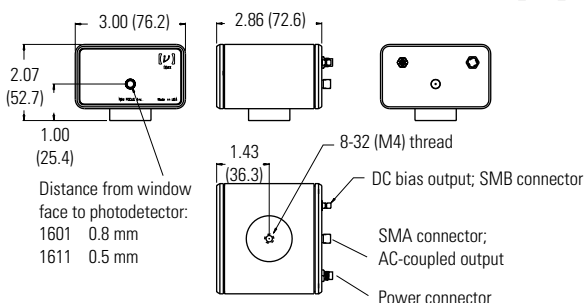
<sup>[6]</sup> FSK uses trigger input (1 MHz maximum)

<sup>[7]</sup> Sine and square waveforms above 6 MHz are allowed only with an "infinite" burst count



# **Model 1611** **Specifications**

## ***Dimensional***



## ***Performance***

Coupling:	AC
Bandwidth (3 dB):	30 kHz–1 GHz
Wavelength Range:	900–1700 nm
Photodiode Material:	InGaAs PIN
Photodiode Size:	100- $\mu$ m diameter
Power Requirements:	$\pm 15$ V DC; 300 mA
Risetime:	400 ps (est.)
Current Gain:	700 V/A
Input Noise Current:	16 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
N.E.P.	20 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (@1.3 $\mu$ m)
Output Current:	10 mA (max into 50 $\Omega$ )
Input Power: (Linear Operation)	1 mW (max @ 1.3 $\mu$ m)
Input Power (CW):	10 mW (max w/o damage)
Dynamic Range:	>60 dB (typ)

### **Connectors**

Input:	FC, or direct
RF Output:	SMA
DC Bias Monitor:	SMB

# Assembly instructions for the Fiberlogix Polarization Controllers

Using 900 $\mu$ m buffered fiber for a design wavelength of 1550 nm.

- Remove rubber-holding clamps A, B and C.
- Tighten screws 1,2,3 and 4.
- Loosen screws 5 and 6.

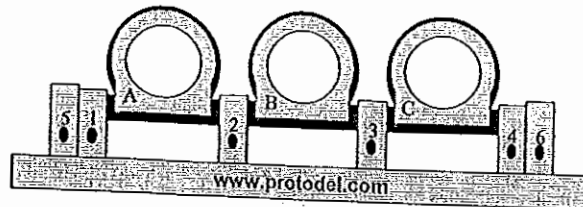


Figure 1 Front view of polarization controller.

- Rotate controller waveplates A, B and C to the front as far as possible as shown in Figure 2 and Figure 3.

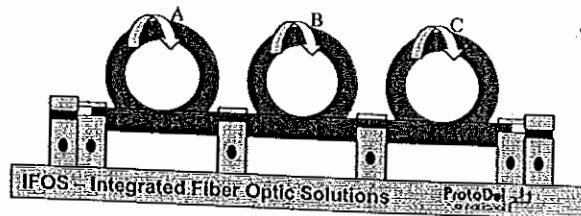


Figure 2 Back view.

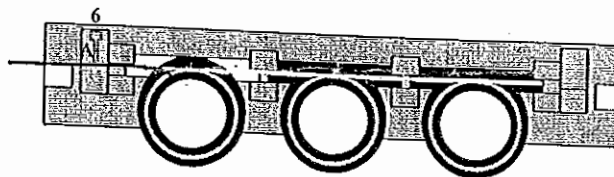


Figure 3 Top view.

## Fitting the fiber.

- Untwist a length of at least 1m of single mode fiber.
- Place fiber end under fiber clamp A. Press down on clamp A and tighten screw 6.
- Place fiber in groove on waveplate. For  $\frac{1}{4}$  wave plate wind two turns of fiber in waveplate groove. Make sure that there is no twist in fiber.
- Replace rubber-holding clamp.

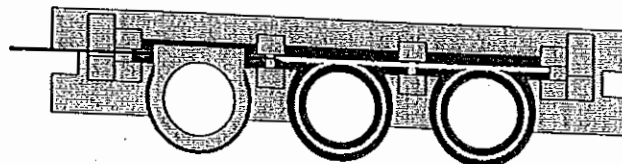


Figure 4 Fit first fiber waveplate.



- Place fiber in groove on waveplate. For  $\frac{1}{2}$  wave plate wind three turns of fiber in waveplate groove. Make sure that there is no twist in fiber.
- Replace rubber-holding clamp.

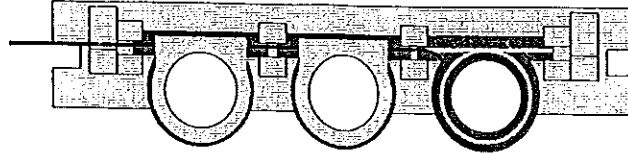


Figure 5 Fit second fiber waveplate.

- Place fiber in groove on waveplate. For  $\frac{1}{4}$  wave plate wind two turns of fiber in waveplate groove. Make sure that there is no twist in fiber.
- Replace rubber-holding clamp.

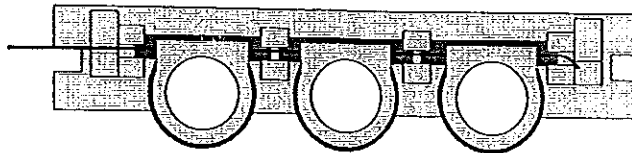


Figure 6 Fit third waveplate fiber.

- Place fiber under clamp B. Press down on clamp B and tighten screw 5.

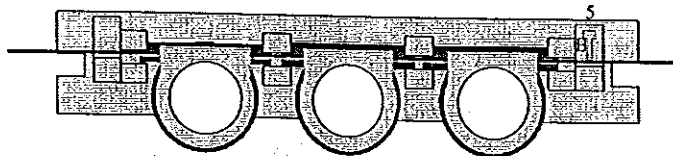


Figure 7 Clamp fiber tight.

## Polarization controller response

- By rotating the  $\frac{1}{4}$  and  $\frac{1}{2}$  wave plates thru 180 the following polarization rotations should be obtained.

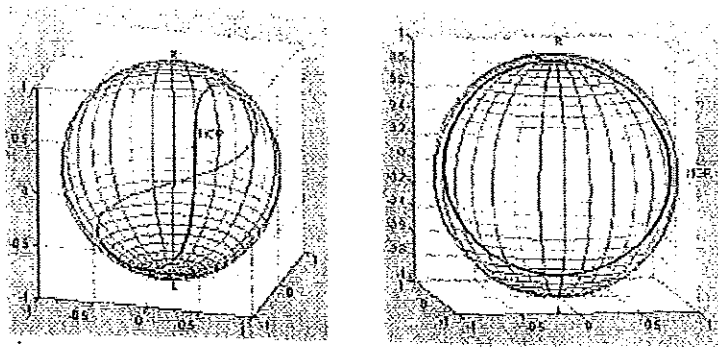


Figure 8(a)  $\frac{1}{4}$  waveplate polarization behaviour. (b)  $\frac{1}{2}$  waveplate polarization behaviour.

# HYPERION Optical Sensing Instrument | si155



## Description

The si155 is an industrial grade fan-less optical sensing interrogator. Featuring both static and dynamic full spectrum analysis, the si155 provides long-term, reliable and accurate measurements of hundreds of sensors on 4 parallel, 160 nm wide channels.

The si155 features a high-power, low-noise, ultra-wide swept wavelength laser with guaranteed absolute accuracy on every scan which is realized with Micron Optics patented Fiber Fabry-Perot filter and wavelength reference technology.

The HYPERION platform, on which the si155 is based, features groundbreaking capabilities including high-performance DSP and real-time FPGA processing on-board. This enables rapid, full-spectrum data acquisition and flexible peak detect algorithms of Fiber Bragg Gratings (FBG), Long Period gratings, Fabry-Perot (FP) and Mach-Zehnder (MZ) sensors with low-latency access to data for closed loop feedback applications.

The HYPERION platform is now compatible with ENLIGHT, Sensing Analysis Software, which provides a single suite of tools for data acquisition, computation, and analysis of optical sensor networks, see <http://www.micronoptics.com/products/sensing-solutions/software/> for more information. The HYPERION platform also includes a comprehensive Application Programming Interface (API) and examples written in LabVIEW, Python, Matlab, C++ and C#.

**Dynamic and absolute measurements of FBG & FP sensors on 4 parallel, 160 nm wide channels and ENLIGHT compatible.**



## Key Features

**Standard, and High Speed** models, each with an available depolarized source and up to 4 parallel channels

**Dynamic and absolute measurements of FBGs, LPGs, FP and MZ sensors** from detailed optical spectrum

**Deep, continuous dynamic range** is available to each sensor on each channel, independent of differential system losses

**Data verification key guarantees only valid output.** Each data set is calibrated and verified against a permanent NIST traceable reference.

**Proven reliability and longevity of the Micron Optics swept wavelength source,** with over 100 million hours logged since 2000



## Deployments

**Oil & gas** (well reservoir management, platform structural health, pipeline condition)

**Medical devices** (probes, catheters)

**Industrial measurements** (industrial heaters and metal fabrication process control)

**Energy** (wind turbines, oil wells, pipelines, nuclear reactors, generators)

**Structures** (bridges, dams, tunnels, mines, buildings)

**Security** (perimeter intrusion, heat detection, security gate monitoring)

**Aerospace** (airframes, composite structures, wind tunnels, static tests)

# HYPERION Optical Sensing Instrument | si155



## Performance Properties

Measurement option	Enhanced visibility, 10 Hz	Standard, 100 or 1000 Hz	High speed, 5000 Hz
Number of channels	1 or 4 parallel channels	1 or 4 channels	1 or 4 channels
Wavelength range	100 or 160 nm	60, 100 or 160 nm	80 nm
Wavelength accuracy / stability <sup>1</sup>	1 pm / 1pm	1 pm / 1pm	2 pm / 3 pm
Wavelength repeatability <sup>2</sup>	1 pm, 0.3 pm at 1 Hz	1 pm, 0.05 pm at 1 Hz	2 pm, 0.05 pm at 1 Hz
Dynamic range / continuous <sup>3</sup>	35 dB peak / 45 dB FS	25 dB peak / 40 dB FS	17 dB peak / 40 dB FS
Full spectrum measurement <sup>4</sup>	Included, data rate at 10 Hz		
Optical connectors	LC/APC		
Compatible sensors <sup>5</sup>	Fiber Bragg Gratings, Long period gratings, Fabry-Perot and Mach-Zehnder Sensors		

## Interfaces and Software

Interface	Ethernet
Software	Comprehensive API and example support for LabVIEW™, Python, Matlab, C++, C#

## Physical Properties

Dimensions / weight	206 mm x 274 mm x 79 mm / 3.0 kg
Operating / storage conditions	-20 to 60 C, < 80%RH non-condensing / -30 to 70 C, < 95%RH non-condensing
Input voltage	9 - 36 VDC, AC/DC converter included (100~240 VAC, 47~63 Hz)
Power consumption at 12 V	30 W typ, 40 max

Model Configurations	Optical channels	Channel upgradeable <sup>6</sup>	Scan rate / Wavelength range			Depolarizer option <sup>7</sup>
			Enhanced visibility	Standard	High speed	
<a href="#">si155-01-ST/060-dd</a>	1	●	10 Hz / 160 nm	100 Hz / 60 nm	●	●
<a href="#">si155-01-mm/100-dd</a>	1	●	10 Hz / 100 nm	1000 Hz / 100 nm	●	●
<a href="#">si155-01-mm/www-dd</a>	1	●	10 Hz / 160 nm	1000 Hz / 160 nm	5000 Hz / 80 nm	●
<a href="#">si155-04-mm/100-dd</a>	4	●	10 Hz / 100 nm	1000 Hz / 100 nm	●	●
<a href="#">si155-04-mm/www-dd</a>	4	●	10 Hz / 160 nm	1000 Hz / 160 nm	5000 Hz / 80 nm	●

## Options and Accessories

<b>x55_rkm</b>	19" rack mount kit
<b>x55_cas</b>	x55 transport case
<b>x55_atx</b>	ATEX certified
<b>x55_ew3</b>	3 year extended warranty
<b>oa2001</b>	LC/APC-FC/APC connectivity kit

## Notes

- Accuracy per NIST Technical Note 1297, 1994 Edition, Section D. 1.1.1, definition of "accuracy of measurement." Stability captures effects of long term use over operating temperature range.
- Per NIST Technical Note 1297, 1994 Edition, Sect D.1.1.2, definition of "repeatability [of results of measurements]."
- Loss and/or sensor shape may affect repeatability and accuracy for each option as described in Micron Optics TN 1115.
- For faster scan rates >10 Hz, data bandwidth may limit rate of multichannel spectral streams.
- FBG bandwidths of 0.25 nm used for performance qualification.
- For selected configurations, the number of optical channels may be upgraded to 4 channels. Contact MOI for details.
- For details regarding the Depolarized laser option, see [http://www.micronoptics.com/wp-content/uploads/2016/11/TN1108\\_x55\\_Depolarized\\_Laser\\_Option.pdf](http://www.micronoptics.com/wp-content/uploads/2016/11/TN1108_x55_Depolarized_Laser_Option.pdf)
- Complies with the WEEE Directive 2012/19/EU for the following European countries: UK, IT, DE, FR, NL, BE, ES, CH.

## Ordering Information

### [si155-cc-mm/www-dd](#)

<b>cc</b>	Number of channels
01	1 channel
04	4 channels
<b>mm</b>	Measurement option
EV	Enhanced visibility
ST	Standard
HS	High speed
<b>www</b>	Wavelength range
060	60 nm, 1520-1580 nm
080	80 nm, 1500-1580 nm
100	100 nm, 1500-1600 nm
160	160 nm, 1460-1620 nm
<b>dd</b>	Depolarizer option
NO	No depolarizer
DP	Depolarizer



1852 Century Place NE  
Atlanta, GA 30345 USA  
[www.micronoptics.com](http://www.micronoptics.com)



All rights reserved.  
Specifications subject to change without notice.

# FSM-100series

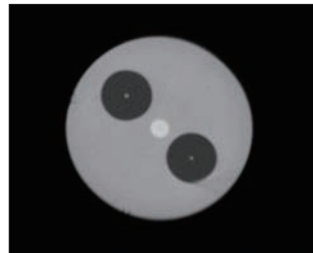


**FSM-100P+**

**FSM-100P**

## Specialty Fiber Fusion Splicers

# FSM-100series



- Advanced plasma zone control methods
- LDF (Large Diameter Fiber) splicing capability
- Enhanced arc calibration methods
- Dual splice loss estimation
- Enhanced Sweep arc
- Fiber profile learning function
- Enhanced ability for fiber shaping, glass processing, tapering
- EndView observation system (FSM-100M+, FSM-100P+)
- Advanced PM fiber alignment methods (FSM-100P, FSM-100P+)



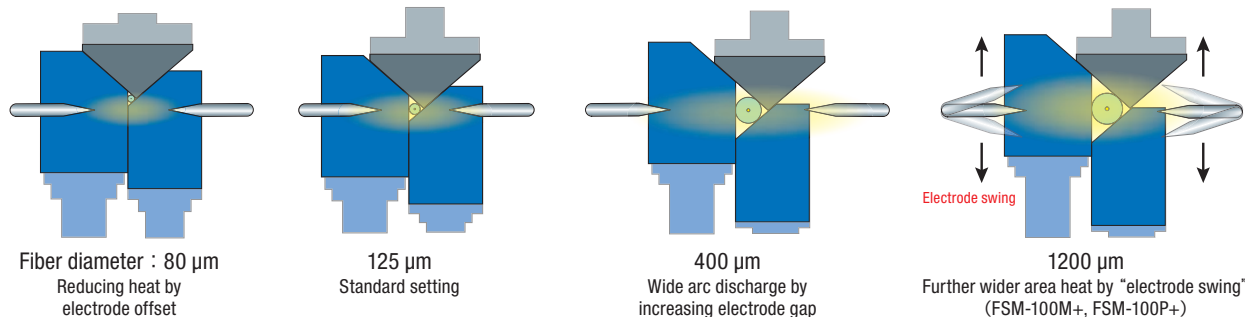
# FSM-100series

Fujikura specialty fiber splicer FSM-100 series offer a host of innovative technology to address the rapidly expanding splicing needs for factory, manufacturing, laboratory and R&D applications. These models are introduced as "ArcMaster" splicers due to their unique capabilities to control the plasma zone of the fusion arc. These capabilities will revolutionize the way users will splice various types of specialty fibers, LDFs, PMFs and so on.

## Functions

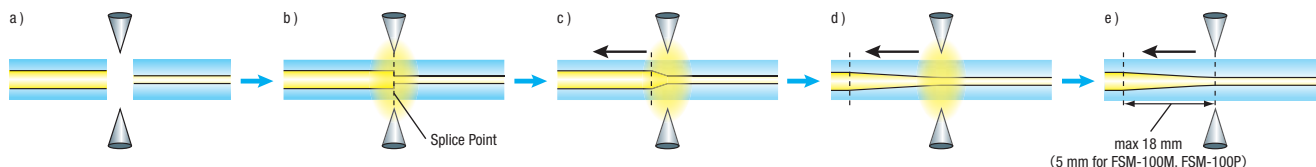
### Optimum Plasma Zone Control

Patented "Split V-groove" and electrode systems create flexible the plasma zone flexible.



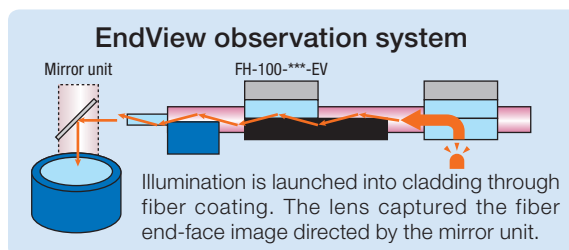
### Enhanced Sweep Arc

Sweep function moving both L and R fiber together, guides to better splice loss especially for dissimilar fiber splicing and fiber shaping.



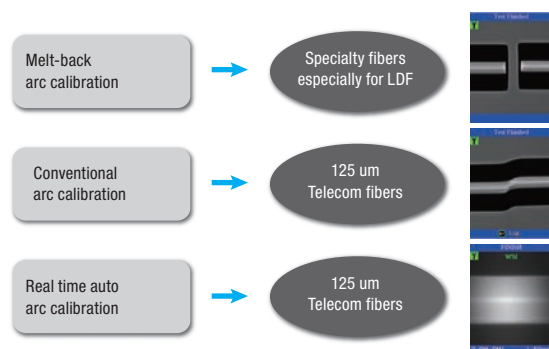
### PM Fiber Splicing FSM-100P, FSM-100P+

- Three alignment methods for PM fibers
- Fast PANDA mode aligning by PAS system
- New IPA mode for aligning all kinds of PM fibers
- EndView PM fiber aligning (FSM-100P+ only)



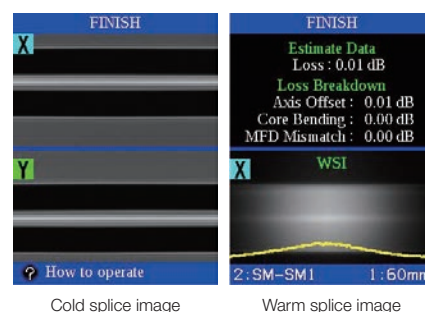
### Enhanced Arc Calibrations

FSM-100 series provides three types of arc calibration methods, for not only 125  $\mu\text{m}$  fibers but also LDF.



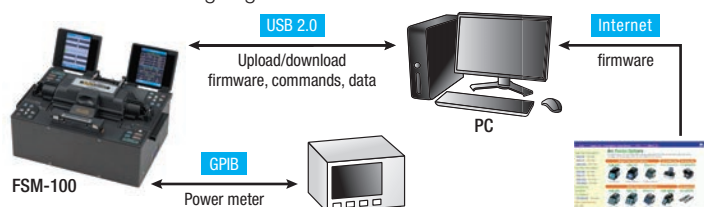
### Dual Splice Loss Estimation

FSM-100 series provides loss estimation method by both cold and warm splice image. It offers accurate splice loss estimation.



### USB, GPIB Communication

Splicer firmware can be upgraded via internet connection. Also, splice data upload/download is available. GPIB connection provides power meter feedback aligning.



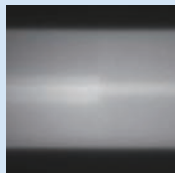

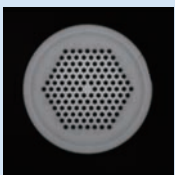



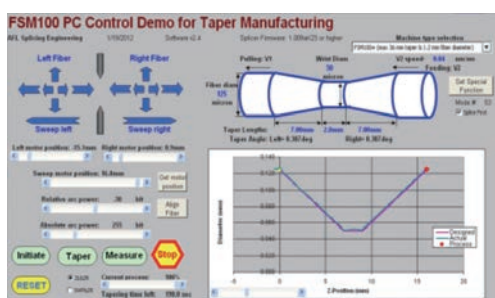
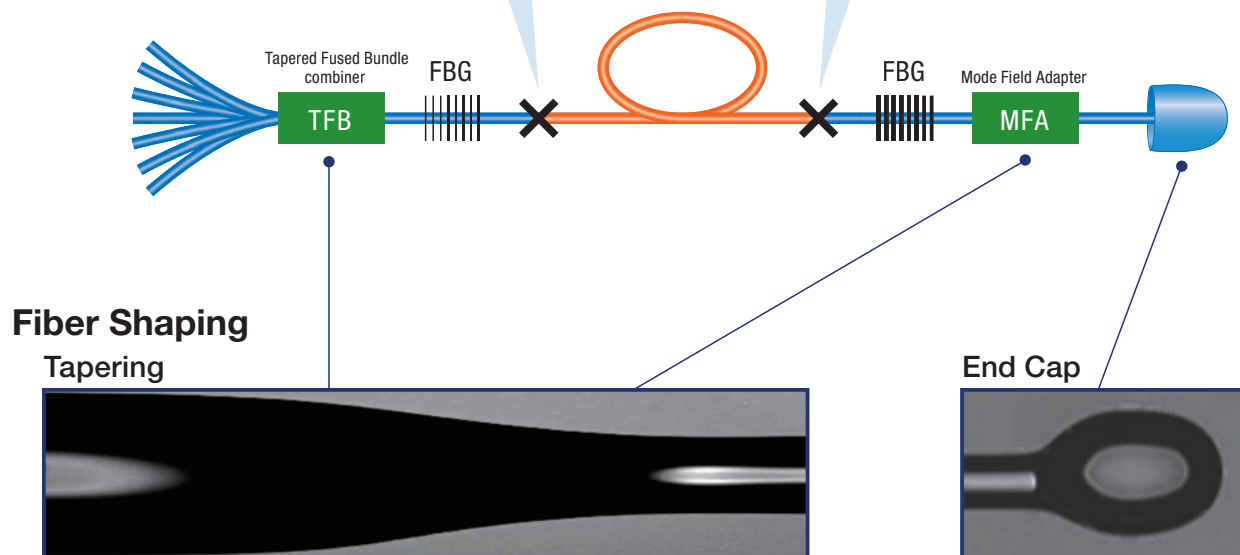
### Fiber Profile Learning function

The splicer learns the fiber profile with the adequate focusing in order to observe the core accurately. After learning, it shorten the splicing time. FSM-100P and FSM-100P+ learn the PM fiber profile to analyze polarization.

# FSM-100 series can...

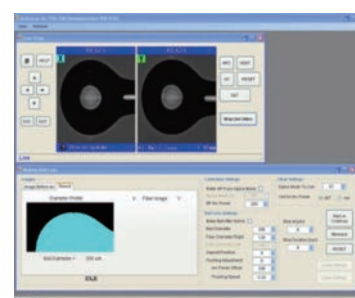
## Specialty Fiber Splicing

PM Fiber Splicing	Special Shape Fiber Splicing	Dissimilar Fiber Splicing
 <p>By PAS FSM-100P FSM-100P+</p>	 <p>Polygon shape fiber FSM-100P+</p>	 <p>Different MFD</p>
 <p>By EndView FSM-100P+</p>	 <p>Photonic crystal fiber (NKT Photonics) FSM-100M+ FSM-100P+</p>	 <p>Different diameter</p>



PC software "SpliceLab" for "Fiber Shaping" is available.

Applicable to  
Microsoft Windows® XP7,8



## Comparison of FSM-100 series

	FSM-100M	FSM-100P	FSM-100M+	FSM-100P+
Cladding diameter	60 ~ 500 $\mu$ m		60 ~ 1200 $\mu$ m	
Cleave length	Coating clamp	3-8 mm (standard 4 mm)		3-21 mm (standard 4 mm)
	Glass clamp	3-13 mm (standard 9 mm)		8-26 mm (standard 9 mm)
PM fiber splicing	—	✓	—	✓
EndView	—		✓	
Electrode swinging	—		✓	
Maximum sweep length	$\pm$ 5 mm		$\pm$ 18 mm	

# Fujikura FSM-100series

## SPECIFICATIONS

Description	FSM-100M	FSM-100P	FSM-100M+	FSM-100P+
Applicable Fiber	Fiber Type SMF (ITU-T-G652), NZDSF (G655), MMF (G651), EDF, DCF LDF (large diameter fibers) and other specialty fibers.			
	PM fiber	—	PANDA and other PMF	—
	Cladding Diameter	60 to 500 µm	60 to 1200 µm	
	Coating Diameter	100 to 2000 µm		
Cleave Length	Fiber Count	single		
	Coating Clamp	3-8 mm (standard 4 mm)	3-21 mm (standard 4 mm)	
Typical Splice Loss	Glass Clamp	8-13 mm (standard 9 mm)	8-26 mm (standard 9 mm)	
	SMF	0.03 dB		
	NZDSF/LDF	0.05 dB		
	MMF	0.02 dB		
Typical Splice Time	PMF	—	0.06 dB	0.06 dB
	SMF	15 sec		
	NZDSF/LDF	25 sec		
	PMF (PANDA)	—	30 to 50 sec	30 to 50 sec
Typical Polarization Crosstalk	PMF (non-PANDA)	—	70 to 300 sec	70 to 300 sec
	PMF (PANDA)	—	-40 dB/0.6 deg	-40 dB/0.6 deg
	PMF (non-PANDA)	—	-32 dB/1.6 deg	-32 dB/1.6 deg

## STANDARD ITEMS

Name	Model	FSM-100M	FSM-100P	FSM-100M+	FSM-100P+
Splicer Main Body	FSM-100M	1pc	—	—	—
	FSM-100P	—	1pc	—	—
	FSM-100M+	—	—	1pc	—
	FSM-100P+	—	—	—	1pc
Carrying Case	CC-27	1pc			
Fiber Holder	FH-100-250	1pair			
	FH-100-250-EV	—		1pair	
	FH-100-400	—	1pair	—	1pair
	FH-100-400-EV	—			1pair
AC Adaptor	ADC-15	1pc			
AC Code	ACC-xx	1pc: ACC-01: Japan, -02: USA, -03: UK, -04: EU, -05: Australia			
Electrodes	ELCT2-25	2pairs (1pair for spare)		—	
	ELCT3-25	—		1pair	
	ELCT3-25-LDF	—		1pair for spare	
EndView Light Source	EV-LS01	—		2pcs	
USB Cable	USB-01	1pc			
Dust Cleaning Stick	DCS-01	1pc			
Electrode Cleaner	EC-01	—		1pc	
Warning and Cautions	W-100MP-E	1pc			
Instruction Manual	M-100MP-E	1pc			
Splicing Report	SR-01-E	1pc			

## OPTIONAL ITEMS

Item	Model	Note
Fiber Holder	FH-100-xxx	xxx: coating diameter
	FH-100-xxx-EV	060, 100, 125, 150, 180, 210, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000 -EV model is the fiber holder for EndView observation system.
Fiber Cleaver	FH-40-LT900	for 900 µm coating loose tube fiber.
	CT-100	Cladding diameter: 80-250 µm, Cleave length: 3-40 mm, Angled cleaving available up to 15 deg.
	CT-105	Cladding diameter: 80-1250 µm, Cleave length: 5-40 mm
	CT-106	Cladding diameter: 80-1250 µm, Cleave length: 5-40 mm, Angled cleaving available up to 15 deg.
	CT-32	Cladding diameter: 125 µm, Cleave length: 3-5, 8-10 mm
	CT-38	Cladding diameter: 80 µm, Cleave length: 3-5, 8-10 mm
Jacket Stripprt	JS-02-900	Cladding diameter: 125 µm, Coating diameter 900 µm
	HJS-02	Cladding diameter: 125 µm, Coating diameter 250-400 µm
	HJS-02-80	Cladding diameter: 80 µm, Coating diameter up to 250 µm
	PCS-100	for polyimide coated fiber
Ultra Sonic Cleaner	USC-03	
Recoater & Cleaner	FSR-05/FSR-06/FSR-07	Selectable moldsize: 195 µm, 255 µm, 280 µm, 450 µm, 670 µm, 1000 µm
Protection Sleeves	FP-, FPS-series	

Please visit **NEW** web site!

<http://www.fusionsplicer.fujikura.com>

Description	FSM-100M	FSM-100P	FSM-100M+	FSM-100P+
EndView Observation System	—		with EndView mirror	
Return Loss	>>60 dB			
Tube Heat Time	30 sec for FP-03 (40 mm), 24 to 45 sec for FPS-series			
Electrode Life	2500 arc discharged, SMF with 1 mm electrode gap			
Proof Test	1.96 to 2.45 N			
Image Magnification on LCD	35 to 300 changeable			
Num. of Splice Program	300 for splice, 100 for heater mode			
Num. of Splice Data Storage	2000 for splice data, 100 for splice image			
Language	English / Japanese / Chinese / French			
Display	Dual 4.1" color LCD monitor			
Dimensions [mm] ※ 1	311 (W) x 232 (D) x 160 (H)	470 (W) x 232 (D) x 160 (H)		
Weight	7.5 kg	8.0 kg	7.9 kg	9.0 kg
Power Supply	AC100-240 V (50/60 Hz) with AC adaptor ADC-15			
Operation Condition	0 to 95%RH and 0 to 40° respectively			
Storage Condition	0 to 95%RH and -40 to 80° respectively			
Terminals	Power supply: DC19 V 4.5 A			
	USB2.0 (mini-B type) for PC communication			
	IEEE-488 24pin for power meter feedback splicing			
	Two 6 pin mini-DIN connector for external equipments			

※ 1 : excluding rubber foot

## STANDARD PACKAGE



**Fujikura Ltd.**

**Fujikura Asia Ltd.**

**Fujikura Europe Ltd.**

**AFL**

**Fujikura (China) Co., Ltd.**

1-5-1, Kiba, Koto-ku, Tokyo 135-8512, Japan  
Phone:+81-3-5606-1164 Fax:+81-3-5606-1534 <http://www.fujikura.com>

438A Alexandra Road, Block A Alexandra Technopark #08-03 Singapore 119967  
Phone:+65-6-278-8955 Fax:+65-6-278-0965 <http://www.fujikura.com.sg>

C51 Barwell Business Park, Leatherhead Road, Chessington, Surrey KT9 2NY, UK  
Phone:+44-20-8240-2000 Fax:+44-20-8240-2010 <http://www.fujikura.co.uk>

260, Parkway East, Duncan, SC29334, USA  
Phone:+1-800-235-3423 Fax:+1-800-926-0007 <http://www.aflglobal.com>

16th Floor, Shanghai Hang Seng Bank Tower, 1000 Lujiazui Ring Road, Pudong New Area, Shanghai, 200120 CHINA  
Phone +86-21-6841-3636 FAX +86-21-6841-2070

## High Precision Fiber Cleaver CT-32

- The CT-32 is designed for cleaving silica fiber with 125mm cladding diameter, specially for its short length cleaving capability. Minimum 3mm cleave is possible by up to 400mm fiber coating, while the coating to be clamped.
- The CT-32 accepts the fiber setting with FH-40 and FH-100 series Fiber Holder System.



**CT-32**

### SPECIFICATION

Applicable fiber	Silica optical fiber
Fiber count	Single
Cladding diameter	125μm
Coating diameter	250μm to 900μm
Fiber setting	by FH-40 and FH-100 series Fiber Holder
Cleave angle	Typical 0.5 degrees
Blade life	48,000 cleaves 1,000 x 3 height x 16 positions
Dimensions	105W x 82D x 46H (mm)

### STANDARD PACKAGE

Description	Model	Q'ty
Main body	CT-32	1pc.
Fiber scrap collector	FC-02	1pc.
Fiber dust container	FDB-02	1pc.
High capacity container	FDB-03	1pc.
Carrying case	CC-21	1pc.
Cleaver spacer	SPA-40-CT22-040	1pc.
Hexagonal wrench	HEX-01	1pc.
Side cover	SC-01	1pc.
Instruction manual	-	1pc.

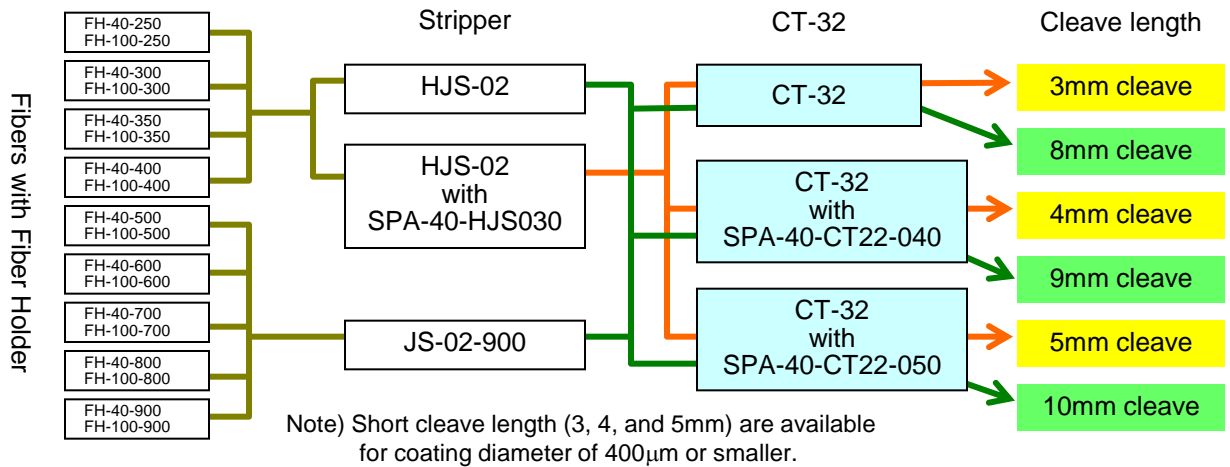
### OPTIONAL ITEMS

Description	Model
Cleaver spacer	SPA-40-CT22-040
Cleaver spacer	SPA-40-CT22-050



# High Precision Fiber Cleaver CT-32

## APPLICATION



Specifications and descriptions are subject to change without prior notice.

**Fujikura Ltd.**

1-5-1, Kiba, Koto-ku, Tokyo 135-8512, Japan

Phone : +81-3-5606-1164 Fax : +81-3-5606-1534 <http://www.fujikura.co.jp>

**Fujikura Asia Ltd.**

438A Alexandra Road, Block A Alexandra Technopark #08-03 Singapore 119967

Phone : +65-6-278-8955 Fax : +65-6-278-0965 <http://www.fujikura.com.sg>

**Fujikura Europe Ltd.**

C51 Barwell Business Park, Leatherhead Road, Chessington, Surrey KT9 2NY, UK

Phone : +44-20-8240-2000 Fax : +44-20-8240-2010 <http://www.fujikura.co.uk>

**AFL**

260, Parkway East, Duncan, SC29334, USA

Phone : +1-800-235-3423 Fax : +1-800-926-0007 <http://www.aflglobal.com>

**Fujikura (China) Co., Ltd.**

7<sup>th</sup> Floor, Shanghai Hang Seng Bank Tower, 1000 Lujiacui Ring Road, Pudong New Area, Shanghai 200120, CHINA

Phone : +86-21-6841-3636 Fax : +86-21-6841-2070 <http://www.fujikura.com.cn>